



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL  
AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA  
LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**

**Jessy Mabel Alfaro Soto**

Asesorado por la Inga. Mayra Maritza Quemé Peña

Guatemala, marzo de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL  
AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA  
LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JESSY MABEL ALFARO SOTO**

ASESORADO POR LA INGA. MAYRA MARITZA QUEMÉ PEÑA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, MARZO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL  
AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA  
LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de noviembre de 2016.



**Jessy Mabel Alfaro Soto**

Guatemala, 23 de agosto de 2017

Ingeniero

Carlos Salvador Wong Davi

Director Escuela de Ingeniería Química

Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Wong

Deseándole éxitos en sus actividades diarias, me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que he aprobado el Informe final de Trabajo de Graduación de la estudiante **Jessy Mabel Alfaro Soto** quien se identifica con el número de carné **201213203** y CUI **2405616000101**, titulado: "**DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**". El cual asesoraré durante la planeación y ejecución.

Agradeciendo la atención a la presente,

Atentamente,



Ing. Qco. Mayra Maritza Quemé Peña

> Colegiado 1791

Asesor



Guatemala, 20 de noviembre de 2017.  
Ref.EPS.DOC.787.11.17.

Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto  
Directora Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Usac.

Inga. Classon de Pinto:


Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **Jessy Mabel Alfaro Soto** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **201213203**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA”**.

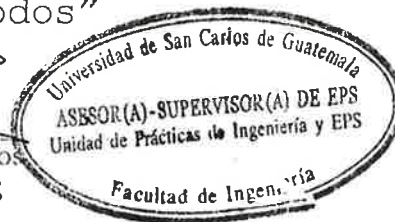
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

  
Ing. Sergio Alejandro Recinos  
Asesor-Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo  
SAR/ra



Guatemala, 20 de noviembre de 2017.  
Ref.EPS.D.481.11.17.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente

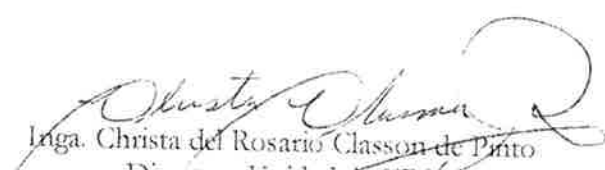
Estimado Ingeniero Wong Davi,

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria Jessy Mabel Alfaro Soto, quien fue debidamente asesorada por la Inga. Mayra Maritza Quemé Peña y supervisada por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesora y el Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

  
Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto  
Directora Unidad de EPS

CdRCdP/ra





Guatemala, 27 de noviembre de 2017.  
Ref. EIQ.TG-IF.054.2017.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **008-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN  
-Ejercicio Profesional Supervisado-**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Jessy Mabel Alfaro Soto**.  
Identificada con número de carné: **2012-13203**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Mayra Maritza Quemé Peña**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo








Ref.EIQ.TG.011.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) de la **carrera de Ingeniería Química** del estudiante **JESY MABEL ALFARO SOTO** titulado: **"DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUÍNTLA"** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

FACULTAD DE INGENIERIA USAC  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
DIRECTOR

Guatemala, marzo de 2018

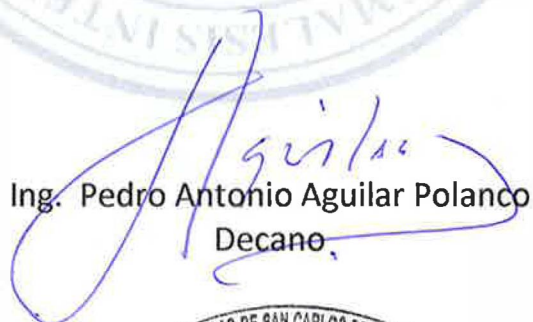
Cc: Archivo  
CSWD/ale



DTG.090.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR BLANCO ESTÁNDAR TIPO B Y CRUDO, INGENIO MADRE TIERRA, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA**, presentado por la estudiante universitaria: **Jessy Mabel Alfaro Soto**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, marzo de 2018

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser mi pilar, mi guía y la luz en el camino de su plan perfecto. Todo se lo debo a Él.
- Mis padres** Iram Alfaro y Hany de Alfaro por apoyarme y estar siempre para mí, por su esfuerzo inmensurable y su amor incondicional, este logro también es fruto de su esfuerzo.
- Mi hermano** Iram Alfaro. Por estar ahí cuando te necesité.
- Luis Pedro Ericastilla** Por ser mi compañero de estudio y mi mejor amigo, por los logros y tristezas vividas, por los desvelos y experiencias juntos. Este logro también es tuyo.
- Mis abuelitos** Emilia del Cid y Carlos Soto. Por siempre preocuparse por mí y nunca dejar de estar pendientes.
- Mis tíos** Rodolfo Girón y Marlene de Girón. Por su apoyo y por ser un ejemplo de superación y emprendimiento.
- Mi segunda familia** Ericastilla Recinos, por darme siempre ánimos y ser la sede de muchos desvelos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi segunda casa durante cinco años. ¡Qué orgullo ser sancarlista!
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por los innumerables conocimientos adquiridos y por ser el lugar de tantas aventuras.
<b>Luis Pedro Ericastilla</b>	Por cada sonrisa que provocabas, por ser la tranquilidad y la luz en medio del estrés, por hacer de la aventura universitaria la mejor, por ser mi compañero de estudios, de aventuras, de risas y de la vida.
<b>Mis papás</b>	Porque en medio de los estudios y desvelos, siempre cuidaron de mí.
<b>Mis amigos</b>	Andrea Beteta, Andrea Aldana, César Quiroz, Benjamín Cancinos, Melissa Martínez, Esther Xiquin, por hacer de los tiempos libres y de los congresos, los mejores recuerdos.
<b>Mis profesores</b>	En especial al Ing. William Fagiani e Inga. Ana Herrera, por compartir sus conocimientos sin egoísmo, por su cariño y apoyo siempre.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS .....	XVII
Hipótesis .....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación .....	2
1.3. Determinación del problema.....	3
1.3.1. Formulación y delimitación del problema.....	3
1.3.2. Alcances y límites.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Modelos de documentación.....	5
2.2. Norma FSSC 22000-2005 .....	6
2.3. Norma ISO 9001-2008.....	8
2.4. Requisitos por parte de PEPSICO.....	10
2.5. Obtención de azúcar .....	11
2.5.1. Tratamiento de jugo.....	11
2.5.2. Clarificación de jugo .....	12
2.5.3. Evaporación.....	14
2.5.4. Clarificación de meladura .....	15

2.5.5.	Sulfitación de meladura .....	16
2.5.6.	Cocimiento o cristalización .....	16
2.5.7.	Centrifugado.....	17
2.5.8.	Secado y enfriado .....	18
2.6.	Cristalización.....	18
2.7.	Cinética de nucleación. ....	19
2.8.	Saturación .....	20
2.9.	Nucleación secundaria .....	21
2.10.	Crecimiento cristalino .....	21
2.11.	Azúcar crudo .....	23
2.12.	Azúcar blanco estándar tipo B .....	23
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Parámetros de verificación.....	25
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	27
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	27
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	27
3.4.1.	Materia prima .....	27
3.4.2.	Equipo .....	28
3.4.3.	Maquinaria.....	28
3.5.	Técnica cualitativa/cuantitativa.....	29
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	30
3.7.	Tabulación, ordenamiento, y procesamiento de la información.....	31
3.8.	Análisis estadístico.....	33
3.8.1.	Índices por calcular en cada proceso o subproceso.....	33
3.9.	Plan de análisis de los resultados .....	35

3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables .....	35
3.9.2.	Programas por utilizar para análisis de datos .....	35
4.	RESULTADOS .....	37
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	51
6.	LOGROS OBTENIDOS .....	57
	CONCLUSIONES .....	59
	RECOMENDACIONES .....	61
	BIBLIOGRAFÍA .....	63
	APÉNDICE.....	65
	ANEXOS.....	69





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Tipos de tanques flash .....	13
2.	Clarificador de jugo .....	14
3.	Evaporador tipo Robert .....	15
4.	Tasa de crecimiento de cristales .....	22
5.	Preparación de masa C en tacho <i>batch</i> .....	38
6.	Preparación de masa B en tacho <i>batch</i> .....	39
7.	Preparación de masa A crudo en tacho <i>batch</i> .....	40
8.	Preparación de masa A crudo en tacho continuo .....	40
9.	Preparación de masa A blanco estándar en tacho continuo .....	41
10.	Preparación de masa A blanco estándar en tacho <i>batch</i> .....	41

### TABLAS

I.	Parámetros de verificación para la elaboración de masa C .....	25
II.	Parámetros de verificación para la elaboración de masa B.....	25
III.	Parámetros de verificación para la elaboración de masa A crudo.....	26
IV.	Parámetros de verificación para la elaboración de semilla para masa A blanco .....	26
V.	Parámetros de verificación para la elaboración de masa A blanco .....	26
VI.	Escala de medición de variables .....	32
VII.	Validez de contenido del documento 1-IN-F-I-025 (instructivo de operación del sistema de vacío en tachos) .....	42

VIII. Validez de contenido del documento 1-IN-F-I-045 (instructivo para el almacenamiento y dosificación de tensoactivo para masa C).....	43
IX. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-046 (instructivo para la operación de tachos <i>batch</i> para masa C) .....	43
X. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-054 (instructivo para la limpieza de tacho <i>batch</i> ) .....	44
XI. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-047 (instructivo para la operación de tachos batch para masa B).....	44
XII. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-065 (instructivo para la operación de cristalizadores de masa A crudo, B Y C).....	45
XIII. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-066 (instructivo de operación de sistema de cristalografía) .....	45
XIV. Validez de contenido documento 1-IN-F-P-005 (procedimiento para la cristalización de azúcar blanco estándar y azúcar crudo).....	46
XV. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-048 (instructivo para la preparación de semilla para masa a crudo).....	46
XVI. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-049 (instructivo para la operación de tacho <i>batch</i> para la cristalización de masa A crudo) .....	47
XVII. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-050 (instructivo para la operación del tacho continuo de azúcar crudo) .....	47
XVIII. Validez de contenido documento 1-in-f-i-051 (instructivo para la preparación y almacenamiento de semilla de masa A blanco) .....	48
XIX. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-052 (instructivo para la operación del tacho continuo de azúcar blanco estándar).....	48
XX. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-053 (instructivo para la operación de tachos <i>batch</i> para cristalización de masa A blanco estándar).....	49
XXI. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-055 (instructivo para la limpieza de tacho continuo de azúcar blanco estándar) .....	49

XXII. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-056 (instructivo para la  
limpieza de tacho continuo de azúcar crudo) ..... 50



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>W</b>	Coefficiente de concordancia de Kendall
<b><math>I_{ik}</math></b>	Congruencia de Osterlind.
<b>°Bé</b>	Grados Baumé
<b>°Bx</b>	Grados Brix
<b>P</b>	Presión (psi)
<b>T</b>	Temperatura (°F)



## GLOSARIO

<b>Azúcar blanco</b>	Azúcar granular blanco para consumo directo. Se clasifica en función del color y pureza.
<b>Azúcar crudo</b>	Azúcar granular no apta para consumo directo, con altos valores de color mayores a 1000 ICUMSA, que principalmente es utilizada como materia prima en otros procesos.
<b>Calandria</b>	Haz de tubos verticales y cortos que están colocados entre dos placas remachadas al cuerpo del tacho o evaporador.
<b>Centrífugas</b>	Máquinas movidas por un motor que gira a diferentes revoluciones por minuto (rpm). En su interior tienen un canasto perforado con telas y o mallas finas que permiten la separación de fases sólido-líquido.
<b>CJM</b>	Jugo de caña y melaza, subproducto utilizado como materia prima para otros procesos o para su venta.
<b>Clarificación</b>	Proceso en el que se separan impurezas del jugo o meladura por medio de la utilización de floculantes.

<b>Condensador barométrico</b>	Equipo utilizado para precipitar vapor por contacto directo, en el que el vapor puede fluir en paralelo o en contracorriente; generando vacío.
<b>Condensado</b>	Agua en estado líquido resultante del cambio de fase del vapor de gases 2, que sale de la calandria del tacho continuo.
<b>Cristalizador</b>	Recipiente con equipo de agitación para almacenar material resultante de los tachos sin que se aglomeren los cristales de azúcar.
<b>Cristalografía</b>	Ciencia que estudia la forma y estructura cristalina de distintos materiales.
<b>Evaporación</b>	Operación unitaria que consiste en la eliminación del agua de alimentos líquidos por ebullición.
<b>Floculación</b>	Proceso químico que permite la aglomeración de sustancias coloidales presentes en un medio líquido a través de la utilización de sustancias químicas llamadas floculantes.
<b>FSSC22000</b>	Sistema de Gestión de Seguridad Alimentaria basado en el Sistema Internacional de Seguridad Alimentaria ISO 22000.



<b>Fundidos</b>	Jarabe resultante de la dilución del exceso de las magmas B y C con agua caliente, contiene una pureza de 85-86 % y una concentración de 55-58°Bx.
<b>HACCP</b>	Análisis de peligros y puntos críticos de control. Método operativo que permite identificar riesgos de inocuidad alimentaria.
<b>ICUMSA</b>	Escala de color utilizada para medir el grado de calidad del azúcar.
<b>IVC</b>	Índice de validez de contenido de Lawshe.
<b>ISO 9001</b>	Norma de calidad que proporciona una serie de requisitos estandarizados para el sistema de gestión de calidad.
<b>ISO 10013</b>	Norma que presenta las directrices para la documentación de los sistemas de gestión de la calidad.
<b><i>Jigger</i></b>	También llamado vapor de agitación, sirve para facilitar el vaciado del tacho para su posterior limpieza.
<b>Lechada de semilla</b>	Solución alcohólica de sacarosa con cristales de 0,06 mm de longitud. Se prepara mezclando cinco libras de azúcar pulverizada con cinco litros de alcohol

	isopropílico, moliéndola en molino Summa Miller durante tres horas.
<b>Magma</b>	Solución concentrada de azúcar con cristales finos de 90°Bx.
<b>Meladura</b>	Jarabe resultante de la concentración de jugo que se da en el sistema de evaporación, donde contiene aproximadamente 65 % de sólidos y 35 % de agua.
<b>RCV</b>	Razón de validez de contenido de Lawshe.
<b>Semilla</b>	Magma o masa cocida de grano fino usado como pie de templa para una masa cocida.
<b>Suspensión alcohólica</b>	Solución alcohólica de sacarosa con cristales de 0.09-0.12 mm de longitud. Se prepara mezclando cinco libras de azúcar blanca estándar Madre Tierra con cinco litros de alcohol isopropílico, moliéndola en molino SUMA de diseño Tate & Lyle durante tres horas.
<b>Tacho</b>	Equipo utilizado en la industria azucarera para el cocimiento de la meladura y mieles con el fin de obtener cristales de azúcar.
<b>Tamiz DSM</b>	Tamiz o filtro estático de tipo curvo, sirve al propósito de eliminar específicamente el material fino del jugo de caña dentro del proceso de clarificación.

## RESUMEN

Esta investigación se fundamenta en el desarrollo final de dieciséis documentos del proceso de cristalización de azúcar blanco estándar tipo “B” y el azúcar crudo, a partir del jugo de caña, en el Ingenio Madre Tierra, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. La meta es cumplir con las normas de calidad ISO 9001-2008, las normas para elaboración de documentos FSSC 22000-2005 y los requerimientos de un nuevo cliente PEPSICO, con la finalidad de generar documentos validados y representativos del proceso operativo de cristalización.

El proyecto estuvo enmarcado en el tipo de investigación descriptiva, fundamentada con un diseño mixto (documental y de campo). Cada uno de los dieciséis documentos, se elaboró en el formato que el Departamento de Sistema de Gestión del Ingenio tiene para la certificación de nuevas normas.

Debido a que el resultado del proyecto es el documento que contenga el procedimiento operativo, es imperativo que el documento sea validado por un grupo de expertos. Por lo tanto, se determinó que para validar y llegar a consenso en el contenido y forma de los documentos creados es necesario utilizar la técnica cualitativa conocida como método Delphi.

Este método permitió evaluar cada parámetro de verificación, cada algoritmo y balances de masa y energía del proceso de todos los documentos realizados, midiendo parámetros como coherencia, relevancia, congruencia y claridad en una escala ordinal, que fueron analizados mediante los índices de validez, tales como: concordancia de Osterlind, validez de contenido Lawshe, índice de validez de contenido de Lawshe y concordancia de Kendall.

De esta manera se pudo concluir que los dieciséis documentos elaborados, desde la primera ronda, los expertos concordaron que en los aspectos de: coherencia, relevancia y congruencia, llenaban los requisitos establecidos y les otorgaron la calificación más alta de la escala. Esto se ve reflejado con los valores de los índices mayores a 0,85 altamente significativos, con alfa menores de 0,05, por lo que permite rechazar la hipótesis nula de no concordancia.

Así mismo, los expertos también concordaron en darle al aspecto de “claridad” (el cual evaluaba comprensión, sintaxis y semántica) el puntaje más bajo, por lo que a excepción del documento 1-IN-F-I-025 que fue aprobado en su totalidad en la primera ronda, cuatro documentos necesitaron dos rondas; tres documentos, tres rondas y ocho documentos, cuatro rondas más, para ser aprobados en su totalidad.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Elaborar e implementar el procedimiento operativo del proceso de cristalización de azúcar blanco estándar tipo B y azúcar crudo en el Ingenio Madre Tierra, tomando como referencia las bases del sistema de gestión de calidad ISO 9001.

### **Específicos**

1. Definir el modelo de documentación estandarizado.
2. Analizar los flujos de entrada y salida que se mantienen en el sistema de cristalización.
3. Evaluar los parámetros de desempeño con los que se ha trabajado en las dos zafas anteriores.
4. Desarrollar un diagrama de flujo para la obtención de azúcar crudo y azúcar blanco estándar tipo B.
5. Elaborar documentos que estandaricen la operación de los equipos involucrados en cada una de las etapas del proceso de cristalización del azúcar.

## **Hipótesis estadística**

### **Hipótesis nula:**

No hay concordancia a un nivel de significancia de 95 % de los expertos en cada documento evaluado.

### **Hipótesis alternativa:**

Existe concordancia a un nivel de significancia de 95 % de los expertos en cada documento evaluado.

## INTRODUCCIÓN

Ingenio Madre Tierra procesa la caña de azúcar para la obtención de los productos de azúcar crudo y azúcar blanco estándar tipo B. Estos pasan por un proceso complejo de transformación, desde el jugo extraído de la caña hasta la formación de los cristales en la etapa de cristalización y posteriormente, pasa por etapas de secado y enfriado para obtener el producto terminado.

La cristalización es una de las etapas esenciales del proceso debido a que se deben tener en consideración cantidades y calidades específicas en la sobresaturación de la meladura para una correcta formación de los cristales de azúcar. También hay que tener en cuenta que la siembra de los núcleos sea adecuada, y en el momento propicio. Por lo tanto, es esencial poseer documentos que permitan mantener el cuidado en la etapa de cristalización, ya que los parámetros de desempeño y la nucleación deben hacerse de forma consistente para mantener la calidad del azúcar.

La cristalización, es un fenómeno de transferencia de masa la cual ha sido manejada en el ingenio como un proceso de experiencia manual y visual por parte de los maestros tacheros, originando un retardado en la optimización de las variables del proceso. Sin embargo, existen normas que permiten mantener el control en los procesos de producción, entre las cuales están la FSSC 22000 y la norma ISO 9001. La primera especifica los requisitos para que el proceso y el producto sean inocuos; la segunda, promueve la adopción del enfoque basado en los procesos para desarrollar, implementar y mejorar la eficacia y aumentar la satisfacción del cliente a través de un producto de calidad.

Por tanto, el diseño del procedimiento operativo de la etapa de cristalización permitirá la estandarización y generación de condiciones constantes que repercuten en la calidad de los productos. De forma que se logre mantener la calidad a lo largo de todas las zafras que el ingenio tendrá en los futuros años, además de programar adecuadamente procesos de optimización que permitan mejorar la eficiencia del proceso de obtención del azúcar crudo y azúcar blanco estándar tipo B.

Sin embargo, la generación de un procedimiento operativo de un proceso tan sensible como la cristalización no debe tomarse a la ligera. Es necesario que todo algoritmo generado sea aprobado por expertos en la materia. Esta situación de validación permite recaer en un método cualitativo poco conocido en el ámbito numérico como es la ingeniería química, siendo este el método Delphi para validación de documentos. Tomando esta premisa de validación, este documento detalla el proceso que se llevó a cabo durante la investigación, el diseño, la elaboración y finalmente la aprobación de los procedimientos e instructivos operativos necesarios para la correcta obtención de azúcar crudo y azúcar blanco estándar tipo B en el Ingenio Madre Tierra.



# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Antecedentes

Central Agro Industrial Guatemalteca, S. A., comúnmente conocida como Ingenio Madre Tierra se ubica en el Km 94,5 carretera a Mazatenango, Santa Lucía Cotzumalguapa, en el departamento de Escuintla, Guatemala. Este ingenio se dedica a la obtención de azúcar blanco estándar, azúcar crudo y jugo de caña y melaza (CJM). Para la obtención de azúcar, ya sea crudo o blanco, las etapas generales son la molienda y extracción de jugo, tratamiento de jugo, clarificación de jugo, evaporación, clarificación de meladura, cristalización y centrifugado.

En la obtención de azúcar blanco estándar se incluyen, además, las etapas de secado y enfriado; mismos que no se encuentran documentados. Por otro lado, en la obtención de CJM no se realiza ninguna cristalización y se asegura que no lleven trazas de azufre (como parte de un requisito del cliente internacional).

Recientemente, Ingenio Madre Tierra se certificó bajo la norma del *Hazard Analysis and Critical Control Points* (HACCP) y FSSC 22000, (*Food Safety System Certification*) manejando un sistema de inocuidad para la línea de obtención de azúcar blanco estándar tipo B, caracterizada por tener un color entre 250 a 450 ICUMSA. La norma FSSC 22000 permite que la organización dentro de la cadena alimentaria demuestre su capacidad de controlar los peligros relacionados con la inocuidad de los alimentos, con el objeto de asegurarse de que el alimento es inocuo en el momento del consumo humano.

Para esto se creó un sistema de gestión con el propósito de lograr mejoras continuas en cuanto a las certificaciones y cumplimiento de normas. Como resultado de la implementación del sistema de gestión, se ha decidido que Ingenio Madre Tierra sea proveedor de una de las fábricas de bebidas carbonatadas más grandes del país. Sin embargo, como parte de sus requisitos según las auditorías realizadas, es necesario la documentación del proceso de fabricación del azúcar, específicamente el área de cristalización.

## **1.2. Justificación**

Ingenio Madre Tierra, como toda empresa, se encuentra en la búsqueda de la superación y estar a la vanguardia del mundo actual. Por ello, cuenta con un sistema de gestión, según el cual se han certificado en las normas HACCP y FSSC 22000. Un nuevo proyecto surge con la idea de mantener estándares de calidad de azúcar producida de forma constante durante la zafra y durante las próximas zafras, de forma que se cumplan con los estándares establecidos por los clientes actuales, permitiendo ampliar el mercado objetivo.

Para mantener la calidad, conjuntamente con la optimización del proceso, se plantea cumplir con los requerimientos de un nuevo cliente, generando la necesidad de describir los procedimientos operativos de las diferentes etapas en la obtención del azúcar estándar a partir de la caña de azúcar. Por lo tanto, es necesario diseñar el procedimiento de operación de la etapa de cristalización de azúcar blanco estándar tipo B y azúcar crudo, incluyendo los parámetros de desempeño, concentraciones, purezas y otros factores.

Por lo anterior, surge la necesidad de documentar el proceso de cristalización, para cumplir en esta primera etapa de gestión de calidad, con

requerimientos del sistema PEPSICO, a nivel nacional e internacional. Es necesario describir el proceso de cristalización de forma que una persona externa comprenda la operación y los factores que afectan la calidad del producto, así como también el proceso de documentación estandarizado, acorde con la normativa ISO 9001, ISO 10013, que se está trabajando en el ingenio.

### **1.3. Determinación del problema**

A continuación se presenta la formulación y delimitación del problema, así como los alcances y límites que presenta.

#### **1.3.1. Formulación y delimitación del problema**

Existe la necesidad de generar una serie documental enfocada al procedimiento operativo de la etapa de cristalización de azúcar crudo y azúcar blanco estándar tipo B que permita estandarizar las condiciones de operación más adecuadas en la cristalización, de forma que se obtenga una calidad constante en la obtención de azúcar.

#### **1.3.2. Alcances y límites**

La documentación abarca desde la recepción de meladura clarificada y/o sulfitada hasta la obtención del azúcar que deberá entregarse a las centrífugas, permitiendo estandarizar las condiciones de operación en el proceso de cristalización de azúcar crudo y azúcar blanco estándar tipo B.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Modelos de documentación

En el sistema de gestión del Ingenio Madre Tierra se ha establecido un modelo de documentación que permita realizar un procedimiento estandarizado al momento de crear cualquier documentación dentro del ingenio. Este modelo incluye:

- Encabezado

Esta sección contiene los datos referentes al documento en cuestión, de forma que pueda identificarse fácilmente y verificar si el documento está vigente. Incluye el logo, nombre del documento, código del documento, fecha de realización, versión y número de página.

- Cuerpo del documento

En esta parte del documento se hace una división en secciones:

- Alcance: como su nombre lo indica, establece a qué áreas o procesos aplica el documento en cuestión. Limita el campo de acción del documento.
- Propósito: establece el objetivo principal del documento.
- Términos y definiciones: hace alusión a los términos que se encontrarán dentro del desarrollo del documento y que pueden generar duda respecto de su definición. Se enumeran los

conceptos y sus respectivas definiciones de forma que sean de fácil comprensión; deben ordenarse alfabéticamente.

- Desarrollo: esta es la sección en la que se coloca el contenido del documento y posee libertad en cuanto a la forma de colocar la información.
  - Documentos relacionados: incluye una lista en la que se indican los documentos que mantienen relación con la información colocada en el desarrollo o con el documento en sí.
  - Anexos: todos aquellos documentos que pueden ayudar a enriquecer el contenido del documento.
  - Control de cambios: esta sección, como su nombre lo indica, permite mantener el control en los cambios que se realicen luego de que el documento sea autorizado y difundido. Corrobora los cambios realizados entre cada versión del documento.
- Pie de página

En la primera página se incluye un cuadro en el que se colocan las firmas de los dueños de los documentos. Incluye los puestos de quién elaboro, revisó y autorizó. En el resto del documento, el pie de página constituye únicamente una oración que indica la pertenencia del documento a Ingenio Madre Tierra.

## **2.2. Norma FSSC 22000-2005**

La norma FSSC 22000 ha sido elaborada basada en ISO 22000 e ISO 22003 para certificar los sistemas de seguridad alimentaria de las organizaciones que procesan o fabrican productos de origen animal, productos vegetales perecederos, productos con una larga vida útil, (otros) ingredientes

alimenticios como aditivos, vitaminas y cultivos biológicos, así como materiales para el empaqueo de alimentos.

Entre los requisitos generales que la norma establece se encuentran:

- La organización debe establecer, documentar, implementar y mantener un sistema eficaz de gestión de la inocuidad de los alimentos y actualizarlo cuando sea necesario, de acuerdo con los requisitos de la norma.
- La organización debe definir el alcance del sistema de gestión de la inocuidad de los alimentos, especificando los productos o categorías de productos, los procesos y los lugares de producción cubiertos por el sistema de gestión de la inocuidad de los alimentos.
- La organización debe asegurarse que se identifican, evalúan y controlan los peligros relacionados con la inocuidad de los alimentos razonablemente previsibles para los productos dentro del alcance del sistema, de tal manera que los productos de la organización no dañen al consumidor directa ni indirectamente.
- La organización debe comunicar la información apropiada, relativa a temas de inocuidad relacionados con sus productos.

Por otro lado, la norma establece requisitos referentes en cuanto a la documentación y al control de documentos. Entre estos se encuentran:

- La documentación debe incluir:
  - Declaraciones documentadas de una política de la inocuidad de los alimentos y de objetivos relacionados.

- Procedimientos documentados y registros requeridos por la norma.
- Documentos que la organización necesita para asegurarse del eficaz desarrollo, implementación y actualización del sistema de gestión de la inocuidad de los alimentos.
- El control de los documentos debe asegurar que todos los cambios propuestos se revisan antes de su implementación para determinar sus efectos sobre la inocuidad de los alimentos y su impacto sobre el sistema de gestión de la inocuidad de los alimentos.

### **2.3. Norma ISO 9001-2008**

La ISO 9001 es una norma internacional que se aplica a los sistemas de gestión de calidad (SGC) y que se centra en todos los elementos de administración de calidad con los que una empresa debe contar para tener un sistema efectivo que le permita administrar y mejorar la calidad de sus productos o servicios.

Para este proyecto en particular, es esencialmente importante el enfoque al área de documentación de los procesos que establece la norma. Por lo que entre los requisitos generales se encuentra que la organización debe:

- Determinar los procesos necesarios para el sistema de gestión de la calidad y su aplicación a través de la organización.
- Determinar la secuencia e interacción de estos procesos.
- Determinar los criterios y los métodos necesarios para asegurarse de que, tanto la operación como el control de estos procesos sean eficaces.



- Asegurarse de la disponibilidad de recursos e información necesarios para apoyar la operación y el seguimiento de estos procesos.
- Realizar el seguimiento, la medición cuando sea aplicable y el análisis de estos procesos.
- Implementar las acciones necesarias para alcanzar los resultados planificados y la mejora continua de estos procesos.

De igual forma que con la norma FSSC 22000, la norma ISO 9001-2008 mantiene requisitos sobre la documentación, entre los cuales se puede enumerar los siguientes:

- Los documentos deben incluir declaraciones documentales de una política de la calidad y de objetivos de la calidad.
- Debe incluirse un manual de la calidad en el cual se integre el alcance del sistema de gestión de la calidad (incluyendo detalles y justificación de cualquier exclusión), procedimientos documentados establecidos para el sistema de gestión de la calidad o referencia de los mismos y, por último, incluir una descripción de la interacción entre los procesos del sistema de gestión de la calidad.
- Incluir los procedimientos documentados y los registros requeridos por la norma.
- Debe incluir los documentos, incluso los registros que la organización determina que son necesarios para asegurarse de la eficaz planificación, operación y control de sus procesos.

El control de los documentos debe realizarse según un procedimiento documentado que permita lo enunciado a continuación.

- Aprobar los documentos en cuanto a su adecuación antes de su emisión.

- Revisar y actualizar los documentos cuando sea necesario y aprobarlos nuevamente.
- Asegurar que se identifican los cambios y el estado de la versión vigente de los documentos.
- Asegurar que las versiones pertinentes de los documentos aplicables se encuentran disponibles en los puntos de uso.
- Garantizar que los documentos permanecen legibles y fácilmente identificables.
- Asegurar que los documentos de origen externo, que la organización determina que son necesarios para la planificación y la operación del sistema de gestión de la calidad, se identifican y que se controla su distribución.
- Prevenir el uso no intencionado de documentos obsoletos, y aplicarles una identificación adecuada en el caso de que se mantengan por cualquier razón.

#### **2.4. Requisitos por parte de PEPSICO**

Dentro de los requisitos del cliente PepsiCo, existe un enunciado que se enfoca en el sistema de gestión de la calidad. Entre estos se verifica la auditoría de proveedores y proceso de aprobación de las compras, se verifica el control de documentos, definición de lote y trazabilidad, entre otros. De esta forma, es necesario contar con los documentos que puedan ser auditables por PepsiCo.

Una de las ventajas con las que cuenta Ingenio Madre Tierra es que ya se encuentran certificados bajo la norma FSSC 22000, que permite tener una base de los requisitos que el nuevo cliente requiere.

## **2.5. Obtención de azúcar**

Guatemala es un país con alta producción de azúcar, cuenta con once ingenios activos que en total cultivan, según la Asociación de Azucareros de Guatemala (ASAZGUA), 27 millones de toneladas de caña molida y 2 822 590 toneladas de azúcar en la zafra comprendida en los años 2015/16. Cada ingenio tiene implementado su propio sistema de obtención en función del azúcar que se estipula producir, así como de la calidad del azúcar que se entregará según los clientes que cada ingenio posee. Sin embargo, la obtención del azúcar se puede simplificar a una serie de etapas elementales en las cuales ocurre la transformación desde la extracción del jugo de caña hasta la obtención del azúcar tal y como se conoce.

### **2.5.1. Tratamiento de jugo**

La primera etapa, luego de la extracción del jugo de la caña de azúcar en los molinos, es el tratamiento de jugo; buscando preparar el jugo ácido y turbio para su posterior clarificación. En el tratamiento de jugo los ácidos orgánicos se eliminan porque sus sales de calcio son insolubles (ácido oxálico, tartárico, etcétera), y las materias albuminoideas se coagulan. Una parte de los materiales pécticos y de los materiales colorantes se destruyen o se insolubilizan.

Existe la posibilidad de utilizar directamente la cal en estado sólido para el tratamiento del jugo, buscando que tenga la menor cantidad de óxido de magnesio posible. Si es posible, debe exigirse valores inferiores al 1 % de MgO para que el proceso de clarificación y posteriormente el de evaporación no se

vean afectados, ya sea por la dificultad de la sedimentación y/o por las incrustaciones que se puedan depositar en los equipos.

Otra forma de utilizar la cal es realizando una solución de cal, para evitar que el proceso de disolución sea lenta y difícil. Para esto, Hugot<sup>1</sup> sugiere que la solución de cal en agua, o comúnmente llamada lechada de cal, se fabrique en dos pequeños tanques, en donde uno de los cuales se debe vaciar mientras se llena el otro. Los tanques deben estar provistos con agitador (8 – 10 rpm), buscando generar una concentración de 15° Baumé.

El último paso en el tratamiento de jugo es el calentamiento. Si está previamente alcalizado, hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba, coagula la albúmina y algunas grasas, ceras y gomas.

### **2.5.2. Clarificación de jugo**

El jugo alcalizado y calentado debe pasar por un proceso de clarificación el cual consiste en la eliminación de impurezas. El tratamiento de jugo, la etapa previa, forma un precipitado denso de composición compleja, en parte más ligero y en parte más denso que el jugo, que contiene sales insolubles de calcio, albúmina coagulada, entre otras cosas. El precipitado por floculación arrastra consigo la mayor parte del material fino que está en suspensión en el jugo y que no ha sido extraído por algún tamizado.

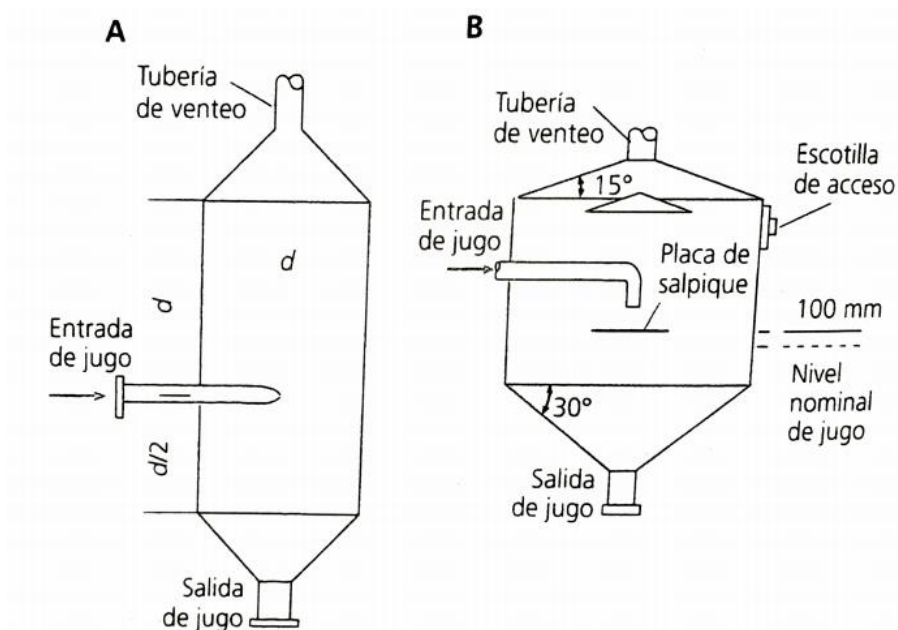
El jugo alcalizado y calentado debe pasar por un equipo llamado tanque flash (figura 1), el cual permitirá adecuar el régimen del jugo para que el proceso de sedimentación en los clarificadores sea adecuado. Dentro de los clarificadores, ocurre una precipitación de los sólidos presentes por la acción del floculante, y de la cal previamente añadida, que genera la aglomeración de

---

<sup>1</sup> HUGOT. *Defecación*. Capítulo 24: p. 400.

los sólidos. Esta aglomeración, por densidad, va formando un lodo en la parte inferior del clarificador. Existe una cantidad muy grande de dispositivos para separar el precipitado del jugo clarificado. El principio universalmente utilizado es el de sedimentación y decantación. Los dispositivos de decantación pueden ser discontinuos o continuos en cuanto a operación. Pero la selección del tipo de equipo por utilizar queda a criterio de las condiciones de cada ingenio.

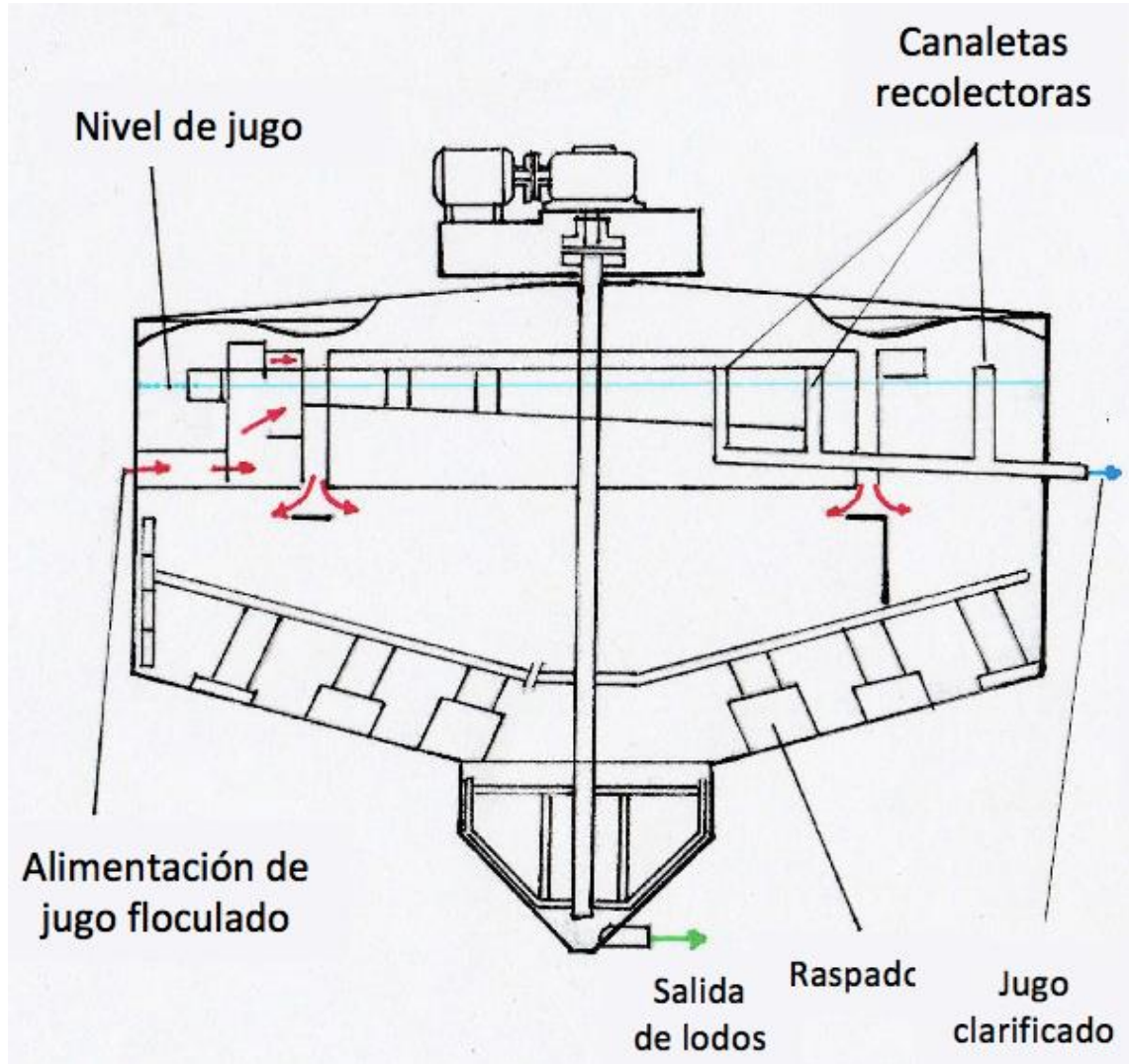
Figura 1. Tipos de tanques flash



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería del azúcar*. p. 250.

Previo a pasar a la siguiente etapa, el jugo clarificado debe pasar por un filtro que servirá como barrera a cualquier impureza que no sedimentó en el clarificador. Este procedimiento queda muy a criterio del ingenio, pero entre los tipos de filtros que se pueden utilizar está el filtro o tamiz DSM para partículas de fibra.

Figura 2. Clarificador de jugo



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería del azúcar*. p. 270.

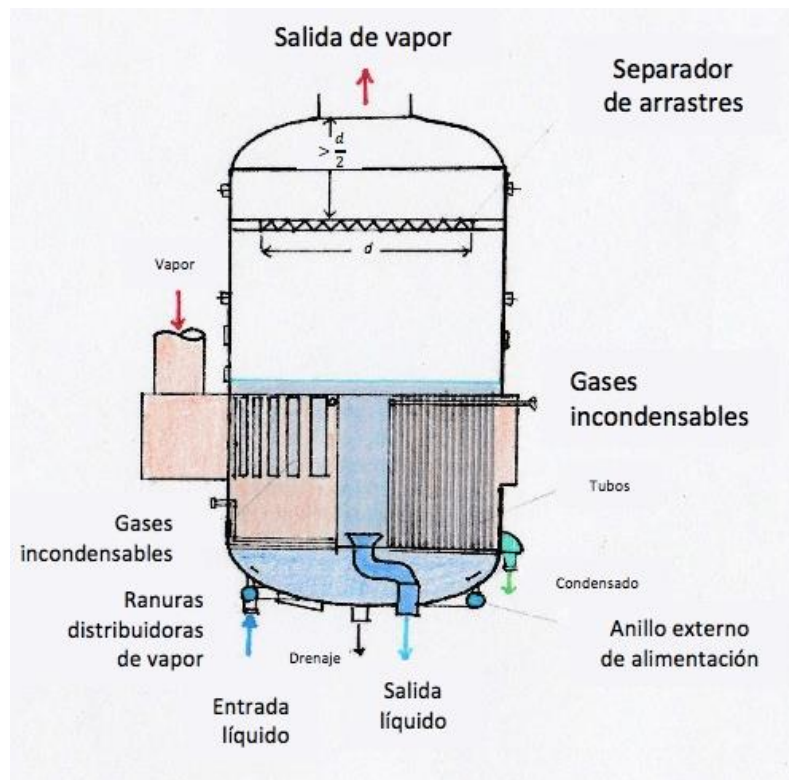
### 2.5.3. Evaporación

El calentamiento del jugo clarificado es la siguiente etapa que se debe realizar, antes de la evaporación. El calentamiento del jugo se realiza

generalmente en intercambiadores de calor del tipo coraza-tubo, de los cuales hay una gran variedad en el mercado.

Tanto la fabricación como la refinación del azúcar crudo de caña requieren evaporar el agua presentada en la solución de azúcar (jugo) a fin de obtener un producto final cristalino. La evaporación se lleva a cabo en una estación o batería de evaporadores de múltiple efecto con el fin de concentrar la solución. El múltiple efecto permite controlar la temperatura de la evaporación para evitar la caramelización del azúcar y obtener una mejor economía de vapor.

Figura 3. **Evaporador tipo Robert**



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería del azúcar*. p. 336.

#### 2.5.4. Clarificación de meladura

El resultado de la evaporación es un jarabe con alta viscosidad y una densidad muy elevada que recibe el nombre de meladura. Esta contiene impurezas en forma de sólidos suspendidos que no pueden sedimentar, por lo que para clarificar la meladura se utiliza un sistema de clarificación por flotación. En este tipo de clarificación, la meladura limpia queda en la parte inferior del clarificador y en la parte superior, sobre la meladura, se va formando una espuma de escoria, que posteriormente se decanta. Esta espuma de escoria es muy estable por lo que es posible alcanzar una elevada remoción de la turbiedad agregando la cantidad y el tipo de floculante adecuado.

Sin embargo, la clarificación de meladura no es una operación estándar en todas las fábricas de azúcar crudo, pero es un proceso que se está empezando a adaptar para mejorar la calidad del azúcar.

#### **2.5.5. Sulfitación de meladura**

A pesar de ser una etapa en la obtención del azúcar, la sulfitación no es una etapa indispensable y universal; incluso, puede realizarse al jugo como parte del tratamiento previo a la clarificación o puede realizarse a la meladura luego de la clarificación. El azufre se utiliza en forma de dióxido de azufre o ácido sulfuroso y busca eliminar las materias colorantes y transformar en compuestos ferrosos incoloros las sales férricas que pueden formarse por el contacto del jugo con los tanques, tuberías y molinos.

La sulfitación de jugo o de la meladura se realiza en una columna de  $\text{SO}_2$  en el que ocurre un contacto directo y a contracorriente.

#### **2.5.6. Cocimiento o cristalización**



En esta etapa, se busca la formación de cristales satisfactorios a partir de la meladura o jarabe obtenido luego de la etapa de evaporación. Este procedimiento se realiza en equipos conocidos como tachos. En estos, la concentración de la alimentación suministrada es, por lo general, de 60 a 65 °Brix, y puede llegar hasta 74 °Brix en una refinería. En la actualidad, existe una gran variedad de tachos entre los cuales, de forma general se pueden clasificar en dos tipos, los que utilizan vapor vivo, y los del tipo calandria, mismos que utilizan vapor de agua o de jugo de escape a baja presión.

En términos generales, es preferible que la fabricación de grano se haga en tachos al vacío, y que no pase de 25 inHg de vacío. Lo que significa que las temperaturas de operación serán de 150 a 160°F, según la pureza. A estas temperaturas la viscosidad será menor y la velocidad de desarrollo (o crecimiento como se hablará más adelante), mayor. Más adelante se ampliará el tema sobre cristalización desde el punto de vista de la transferencia de masa.

### **2.5.7. Centrifugado**

El resultado de los tachos es una masa cocida que contiene los cristales y el licor madre en el que se encuentran. Para separar los cristales de la miel o licor madre se debe utilizar una centrífuga. Este es un equipo conformado por un tambor perforado o canasta que gira sujeto de un eje, esta canasta gira y la masa cocida se distribuye sobre el revestimiento perforado, las mieles son despedidas hacia la caja que rodea la canasta y los cristales son retenidos.

La centrifugación o purgado continúa hasta que los cristales de azúcar o grano queda lo más posible libre de mieles, después de lo cual los cristales pueden continuar siendo purgados de mieles mediante rociado de la pared de azúcar con una cantidad conocida de agua.

### **2.5.8. Secado y enfriado**

El azúcar comercial que sale de las centrifugas y que debe envasarse para su venta o exportación tiene generalmente una humedad entre el 0,5 y el 2 %. Esta humedad disminuye la calidad de conservación del azúcar cuando pasa de cierto límite y particularmente cuando sube del 1 %. Por esta razón, es necesario agregar la etapa de secado y enfriado en el proceso de obtención del azúcar como etapa final antes del envasado.

## **2.6. Cristalización**

La cristalización es una operación de transferencia de masa en la que ocurre la formación de partículas sólidas a partir de una base homogénea. La formación de partículas sólidas puede tener lugar a partir de un vapor, como la nieve, mediante la solidificación de un líquido fundido, como ocurre en la formación de grandes monocristales, o bien como cristalización de una solución líquida. Este proceso destaca sobre otros procesos de separación por su potencial para combinar purificación y producción de partículas en un solo proceso.

La formación de un cristal de calidad, para cumplir con los estándares establecidos por los clientes debe considerar mantener una buena producción y una elevada pureza en el cristal. Sin embargo, el aspecto y el tamaño de los cristales son también importantes. Un cristal es el tipo de materia no viva más altamente organizada. Se caracteriza por el hecho de que sus partículas

constituyentes, que pueden ser átomos, moléculas o iones, están dispuestas en formaciones ordenadas de forma tridimensional llamadas redes espaciales.

Como consecuencia de esta disposición de partículas, cuando los cristales se forman sin la interferencia de otros cristales o cuerpos extraños, se presentan como poliedros con vértices agudos y caras planas.

## **2.7. Cinética de nucleación**

En sí, la formación de un cristal consiste en dos etapas:

- Nucleación: etapa de nacimiento de cuerpos muy pequeños en el interior de una fase homogénea sobresaturada. La velocidad de nucleación es el número de nuevas partículas formadas por unidad de tiempo y unidad de volumen de magma. Puede clasificarse en tres grupos: nucleación espúrea, nucleación primaria y nucleación secundaria.
- Crecimiento del cristal: proceso difusional, modificado por el efecto de las superficies sólidas sobre las que tiene lugar el crecimiento. Las moléculas o iones del soluto alcanzan las caras en crecimiento de un cristal por difusión a través de la fase líquida.

Estas etapas se cumplen únicamente si el agente impulsor de la cristalización está presente y en la cantidad adecuada, es decir, la sobresaturación. Esta puede generarse por medio de uno o más de tres métodos. Si la solubilidad del soluto aumenta muy fuerte con el incremento de la temperatura, el simple enfriamiento producirá la sobresaturación. Si la solubilidad es relativamente independiente de la temperatura, la evaporación de una parte del solvente es la mejor opción. Si no es deseable ni enfriamiento ni

evaporación, la sobresaturación se puede generar mediante la adición de un tercer componente que físicamente interacciona con el solvente y la solubilidad del soluto se reduce bruscamente.

## **2.8. Saturación**

Como se mencionó anteriormente, la sobresaturación es el paso inicial para que se forme el cristal y para que esta ocurra se debe manipular la solubilidad del elemento a favor de la saturación. La solubilidad de la sacarosa pura en el agua varía con la temperatura y aumenta rápidamente cuando la temperatura aumenta. Cuando una solución contiene el total de la sacarosa que es capaz de disolver, se dice que está saturada.

En la industria, el tener una solución que únicamente contenga a la sacarosa (azúcar) y al agua presentes es prácticamente imposible, ya que siempre están presentes materiales impuros como glucosa, sustancias orgánicas, sales minerales, etcétera. Estas soluciones modifican la solubilidad de la sacarosa, provocando que la solubilidad merme cuando disminuye la pureza del jugo obtenido de la caña de azúcar.

La saturación es un estado de equilibrio estable, al cual las soluciones azucaradas no llegan rápida y fácilmente. Si una solución se concentra por evaporación, o si se enfría más allá del punto de saturación, los cristales no aparecen en el material inmediatamente. El azúcar continúa en solución y a esta se le llama sobresaturada.

Es conveniente, para que los cristales se formen en el licor, que exista una sobresaturación considerable. La sobresaturación del licor disminuye en la proporción en que los cristales se forman y crecen. Para conservarla es

necesario mantener la evaporación del agua y el aprovisionamiento del material azucarado. En una solución sobresaturada se pueden identificar tres zonas:

- Zona metastable: es la próxima a la saturación y existe un crecimiento de los cristales existentes. No se generan nuevos cristales.
- Zona intermedia: pueden formarse nuevos cristales, pero solo en presencia de los ya existentes.
- Zona lábil: en donde los cristales existentes crecen y pueden formarse otros aun en ausencia de cristales.

En el desarrollo de una masa, es conveniente conservar al licor madre lo más cerca posible del límite de la zona metastable.

## **2.9. Nucleación secundaria**

En la industria azucarera es más factible utilizar la nucleación secundaria, o como se conoce comúnmente, semillamiento, en donde la meladura se concentra hasta un punto superior al de saturación, después de lo cual se introduce al tacho una cantidad pequeña de polvo de azúcar. Este polvo no sirve de núcleo al grano, sino constituye un choque a la solución sobresaturada, mediante el cual se induce la formación de grano nuevo más pronto que con el procedimiento de la nucleación primaria.

## **2.10. Crecimiento cristalino**

Los cristales crecen en el seno de una disolución sobresaturada a través de dos etapas en serie; la primera es la difusión en la fase líquida de las

unidades de soluto hasta alcanzar la superficie del cristal. La segunda etapa consiste en la integración del soluto y organización dentro de la red cristalina.

Existen leyes que buscan simplificar el estudio del desarrollo y crecimiento del cristal luego de su formación; una de ellas es la ley de McCabe en la que se establece que si todos los cristales del magma, similares geoméricamente y del mismo material, crecen en las mismas condiciones ambientales (idéntica temperatura y campo de sobresaturación uniforme), entonces todos ellos no solo serán invariantes, sino que también crecen a la misma velocidad lineal, independientemente de su tamaño. En la siguiente figura se muestran valores típicos de las tasas de crecimiento cristalino en cada una de las etapas de la cristalización.

Figura 4. Tasa de crecimiento de cristales

Tipo de masa cocida	Pureza de licor madre	Tasa de crecimiento en $\mu\text{m/h}$	Referencia
Refinería - industrial	99	300	<i>Wright (1983)</i>
Refinería - industrial	99	890/110	<i>Lionnet (1999)</i>
Refinería - planta piloto	99	710/31	<i>Lionnet (1999)</i>
Masa A	72-85	150	<i>Wright (1983)</i>
Masa A	70-87	52-121	<i>Miller y Broadfoot (1997)</i>
Masa A	67-83	56	<i>Archibald y Smith (1975)</i>
Masa A - tacho continuo	65-75	35-75	<i>Love (2002)</i>
Masa A	70-85	100-110	<i>Broadfoot (2005)</i>
Masa B	64-80	80	<i>Broadfoot (2005)</i>
Masa B	47-67	22	<i>Archibald y Smith (1975)</i>
Masa C	45-65	20	<i>Wright (1983)</i>
Masa C	40-65	20-25	<i>Broadfoot (2005)</i>
Masa C	38-67	18	<i>Archibald y Smith (1975)</i>

Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería del azúcar*. p. 413.

### **2.11. Azúcar crudo**

El azúcar crudo es el que se produce en las fábricas de azúcar, generalmente destinado a procesos posteriores en refinerías para obtener azúcar blanco. Los cristales son color caramelo, con sabor dulce característico y con un color en rango entre 901 a 2000 UI (ver diagrama de proceso en anexo)

### **2.12. Azúcar blanco estándar tipo B**

A diferencia del azúcar crudo, el azúcar blanco estándar tipo B es un producto más delicado. Los cristales son blanco marfil, con sabor dulce característico, y un máximo de color de 450 UI. (ver diagrama de proceso en anexo)





### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Parámetros de verificación

Las siguientes tablas muestran los parámetros evaluados durante el proyecto para cada una de las etapas necesarias en la cristalización.

Tabla I. **Parámetros de verificación para la elaboración de masa C**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
Presión de vacío	psi
Presión de alimentación de vapor	psi
Concentración de grano virgen	°Bx
Pureza del grano virgen	%
Concentración del grano rebajado	°Bx
Pureza del grano rebajado	%
Concentración de salida de masa C	°Bx
Pureza de masa C	%
Concentración de miel B	°Bx
Pureza de miel B	%
Nivel de operación del tachó	pie <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Parámetros de verificación para la elaboración de masa B**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
Presión de alimentación de vapor	psi
Concentración de miel A	°Bx
Concentración de salidad de masa B	°Bx
Pureza de masa B	%
Presión de vacío	psi
Nivel de operación del tachó	pie <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Parámetros de verificación para la elaboración de masa A crudo**

<b>En tacho <i>batch</i></b>		<b>En tacho continuo</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
Presión de alimentación de vapor	psi	Presión de vacío	psi
Concentración de azúcar crudo	°Bx	Nivel de operación del tacho	pie <sup>3</sup>
Tamaño de cristal	mm	Presión de vapor en calandria	psi
Pureza de masa cocida	%	Temperatura del cuerpo	°F
Presión de vacío	psi	Concentración en cada celda	°Bx
Nivel de operación del tacho	pie <sup>3</sup>	Tamaño de cristal	mm

Fuente: elaboración propia

Tabla IV. **Parámetros de verificación para la elaboración de semilla para masa A blanco**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
Longitud de cristal	mm
Volumen de meladura	pie <sup>3</sup>
Concentración de meladura	°Bx
Presión de vacío	psi
Nivel de operación del tacho	pie <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia

Tabla V. **Parámetros de verificación para la elaboración de masa A blanco**

<b>En tacho <i>batch</i></b>		<b>En tacho continuo</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
Presión de alimentación de vapor	psi	Presión de vacío	psi
Concentración de salida	°Bx	Nivel de operación del tacho	pie <sup>3</sup>
Tamaño de cristal	mm	Presión de vapor en calandria	psi
Pureza de masa A Blanco	%	Temperatura del cuerpo	°F
Presión de vacío	psi	Concentración en cada celda	°Bx
Nivel de operación del tacho	pie <sup>3</sup>	Tamaño de cristal	mm

Fuente: elaboración propia

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

- Campo: implementación y evaluación.
- Área: cristalización, fábrica.
- Proyecto: Diseño y elaboración del procedimiento operativo de cristalización del azúcar blanco estándar tipo B y crudo, Ingenio Madre Tierra, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.
- Ubicación: el proyecto se realizará en la fábrica del Ingenio Madre Tierra, ubicado en el km 94,5 carretera a Mazatenango, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigadora: Jessy Mabel Alfaro Soto
- Asesora: Ing. Mayra Maritza Quemé Peña
- Revisor: Ing. Sergio Alejandro Recinos
- Operadores, supervisores de turno e ingenieros de turno

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Para la realización del proyecto descrito anteriormente, se cuenta con los siguientes recursos:

#### **3.4.1. Materia prima**

- Conocimiento práctico de supervisores de tachos y maestros tacheros.

### **3.4.2. Equipo**

- Equipo de cómputo
- Metro
- Cámara fotográfica

### **3.4.3. Instrumento**

- Bibliografía
- Internet
- Método Delphi

### **3.4.4. Maquinaria**

- Conjunto de tachos de calandria
  - Tacho 1 para masa B (1 204 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 2 para masa B (1 900 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 3 para desarrollo de masa A crudo (920 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 4 para masa A crudo (1 840 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 5 para masa A crudo (1 700 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 6 para masa C (1 800 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 7 para desarrollo de masa A blanco o para masa C (860 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 8 para desarrollo se masa A blanco (880 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 9 para masa A blanco (800 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 10 para masa A blanco (2 100 pie<sup>3</sup>).
  - Tacho 11 para masa A blanco (2 100 pie<sup>3</sup>).

- Tacho continuo de 24 celdas.
- Condensadores barométricos.
- Tanques de meladura.
- Tanques de miel A.
- Tanques de miel B.
- Tanques de meladura sulfitada.
- Tanques de magmas.
- Tanques recibidores de grano virgen y rebajado.
- Tanques de semilla de azúcar blanco.
- Tanque de semilla de azúcar crudo.
- Cristalizadores Werkspoor.
- Cristalizadores continuos.

### **3.5. Técnica cualitativa/cuantitativa**

Para la realización de este proyecto se utilizó el método Delphi, el cual persigue el conceso de un grupo de expertos con base en el análisis y la reflexión de un problema definido, en este caso: Procedimiento operativo de cristalización del azúcar blanco estándar tipo B y crudo

Para realizar el método Delphi se siguieron las siguientes etapas:

- Definir el tema: en el proyecto se trabajaron dos grandes temas: procedimiento operativo para la cristalización del azúcar blanco estándar tipo B” y el procedimiento operativo para la cristalización del azúcar crudo, cada uno de ellos se desarrolló en varios subtemas ya que existen varias etapas para la elaboración del azúcar.

- Elaborar un documento inicial: fue realizado por la epesista a partir de cuestionarios, entrevistas, observación guiada y revisión de material bibliográfico. Posteriormente, el documento que debían analizar los expertos, según fueron generándose iteraciones en el método, dará como resultado el procedimiento operativo elaborado.
- Definir el panel de expertos. Este panel de expertos incluyó a los supervisores de tachos, ingenieros jefes de turno y el jefe de fábrica.
- Informar a los expertos su papel durante el método, de forma que estuvieran enterados del objetivo principal del método.
- Distribuir el documento inicial.
- Tabular respuestas y analizar.
- Iniciar segunda vuelta: se debe tener en cuenta que es un método iterativo y que no hay un número exacto de iteraciones que se deben realizar.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

El método Delphi para el proyecto de diseño y elaboración del procedimiento operativo de cristalización, permitió la obtención de información a través de entrevistas, cuestionarios y análisis de documentos por parte de los expertos en el área. El proyecto se dividió en etapas según los subprocesos (preparación de masa C, preparación de masa B, preparación de masa A crudo en tacho *batch* o continuo, preparación de masa A blanco en tacho *batch* o continuo) que existan dentro del proceso general de cristalización y a su vez, cada etapa estuvo dividida en dos partes.

La parte inicial fue la recolección general de información de la operación en el subproceso estudiado; analizando bajo los parámetros de ingeniería química y las operaciones unitarias la información obtenida. La información obtenida se plasmó como el documento inicial para empezar el proceso iterativo del método Delphi.

La segunda parte estuvo conformada por el método Delphi, en la cual la recolección de la información fue a través de un instrumento que permita medir la validez del contenido del documento elaborado.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento, y procesamiento de la información**

Para la validación del documento realizado, se empleó el método Delphi antes descrito; utilizando un instrumento que puede encontrarse en la sección de anexos como tabla XXIII. Este método permitió tabular la información utilizando variables ordinales que establecen un rango para cada parámetro evaluado del contenido revisado y analizado por los expertos. Cada etapa y subproceso fue evaluado por el experto considerando los siguientes aspectos: congruencia, claridad, coherencia y relevancia, según la siguiente escala de medición ordinal.

Tabla VI. Escala de medición de variables

Variables				
Variable	Medición		INDICADOR	Tipo de variable
<b>Congruencia</b> (Relación contenido-objetivo, según el cual compara el contenido presentado con el objetivo de la etapa y subproceso de cristalización)	-1 no lo mide		El contenido <b>no</b> refleja el objetivo especificado	Ordinal
	0 si existen dudas		El contenido genera <b>duda</b> relacionarlo con algún objetivo	
	1 si lo mide		El contenido <b>si</b> refleja el objetivo especificado	
<b>Claridad</b> (El contenido se comprende fácilmente, es decir, su sintaxis y semántica son adecuadas)	1 No cumple con el criterio		El contenido no es claro	Ordinal
	2 Bajo nivel		El contenido requiere bastantes modificaciones o una modificación muy grande en el uso de las palabras de acuerdo con su significado o por la ordenación de las mismas.	
	3 Moderado nivel		Se requiere una modificación muy específica de algunos de los términos del contenido.	
	4 Alto nivel		El contenido es claro, tiene semántica y sintaxis adecuada.	
<b>Coherencia</b> (El contenido cumple con lo indicado según las normas vigentes y los parámetros de verificación y tiene relación lógica con los balances de masa y energía)	1 No cumple con el criterio		El contenido no tiene relación lógica con el balance de masa y energía	Ordinal
	2 Bajo nivel		El contenido tiene una relación tangencial con el balance de masa y energía	
	3 Moderado nivel		El contenido tiene una relación moderada con el balance de masa y energía que se está estandarizando	
	4 Alto nivel		El contenido se encuentra completamente relacionado con los procesos que se están estandarizando	
<b>Relevancia</b> (El contenido es esencial o importante, es decir debe ser incluido)	1 No cumple con el criterio	No necesario	El contenido puede ser eliminado sin que se vea afectada la validez del contenido	Ordinal
	2 Bajo nivel	útil	El contenido tiene alguna relevancia, pero otra sección puede estar incluyendo lo que describe éste	
	3 Moderado nivel	esencial	El contenido es relativamente importante	
	4 Alto nivel		El contenido es muy relevante y debe ser incluido	

Fuente: elaboración propia.



### 3.8. Análisis estadístico

De cada contenido se realizó una tabla de frecuencias con porcentaje de cómo fue calificado y las observaciones realizadas.

#### 3.8.1. Índices por calcular por cada proceso o subproceso

- Congruencia de Osterlind (1989) y modificado por Rovinelli y Hambleton. La fórmula es la siguiente:

$$I_{ik} = \frac{(N - 1) \sum_{j=1}^n X_{ijk} + N \sum_{j=1}^n X_{ijk} + \sum_{j=1}^n X_{ijk}}{2(N - 1)n}$$

Donde:

$X_{ijk}$ : valoración del indicador  $i$  en el dominio  $k$  por el juez  $j$ . Cada juez valora si el contenido refleja los objetivos especificados

1 = si

-1 = no lo mide

0 = si existen dudas

$N$ : número de secciones que se contemplan en el documento.

$n$ : número de jueces que valoran el documento.

Interpretación: congruencia adecuada mayor a 0,5

- Razón de validez de Contenido de Lawshe (1975) RVC. La fórmula es la siguiente:

$$RVC = n_e - n/2$$

Donde:

$n_e$ : número de expertos que otorgan al contenido calificación esencial en la

variable “Relevancia”

$n$ : número total de expertos que evalúan el contenido

- Índice de validez de contenido IVC de Lawshe (1975)

Este valor se obtiene del promedio de los valores de RVC.

Interpretación: el valor adecuado de este índice debe ser superior a 0,80

- Índice de concordancia de Kendall

Para realizar el análisis estadístico a los datos tabulados en el instrumento 001 de la tabla VII se utilizará el coeficiente de concordancia W de Kendall.

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}K^2(N^3 - N) - K \sum Li}$$

Donde:

$W$ : coeficiente de concordancia de Kendall

$S$ : suma de los cuadrados de las diferencias observadas respecto de un promedio.

$N$ : tamaño de la muestra en función del número de tripletes, tetrapletes, quintupletes, etcétera.

$K$ : número de variables incluidas

$Li$ : ligas o empates entre los rangos.

### **3.9. Plan de análisis de los resultados**

A continuación se detalla el método y el modelo utilizados para analizar los datos recolectados y los programas para dicho análisis.

#### **3.9.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables**

El coeficiente de concordancia de Kendall se utiliza cuando se busca identificar el grado de asociación entre  $k$  conjuntos de rangos. Para esto es necesario utilizar valores ordinarios, por ejemplo, de 1 a 4 como se especifica en la tabla VII, para calificar cada uno de los ítems por evaluar. Estudios mencionan que altos valores de  $W$  (coeficiente de concordancia) pueden interpretarse como un reflejo que los  $k$  expertos están aplicando los mismos estándares al asignar rangos a los parámetros.

#### **3.9.2. Programas por utilizar para análisis de datos**

Para facilitar el análisis de los datos tabulados en el instrumento de la tabla VII, se utilizó el programa SPSS y EXCEL.



## 4. RESULTADOS

Teniendo como base las normas internas y políticas de calidad y comercialización del Ingenio Madre Tierra, que establecen que para evitar conflicto de intereses y competencia desleal, las estadísticas sobre los datos del “diario de fábrica” durante las zafras y los “procesos operativos” para obtención de azúcar de caña, no deben salir del círculo de profesionales laborantes en el Ingenio. La presente sección de resultados incluye únicamente la presentación de los cinco diagramas de flujo para la preparación de masa C, B y A y resultados obtenidos de la validez de contenido, medida por los diferentes índices detallados en la metodología, para cada uno de los procesos operativos desarrollados.

De tal forma que para presentarlos se ha considerado desarrollar esta sección en dos fases

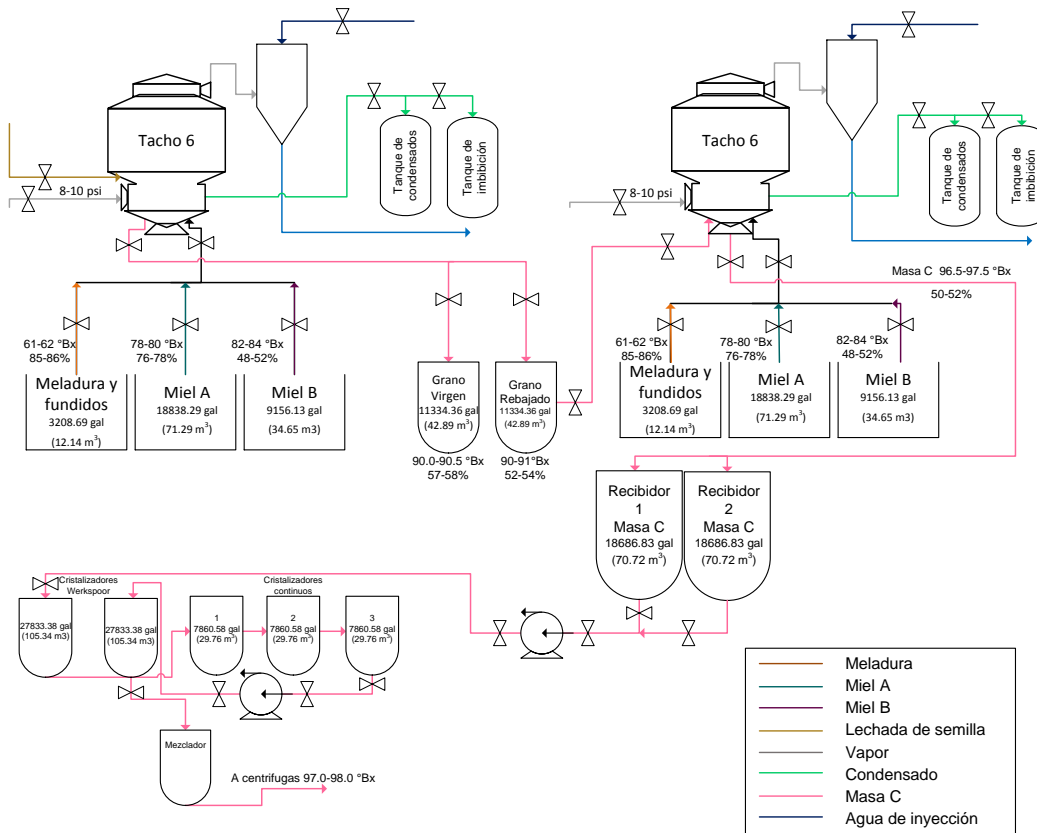
Fase I: presentación de diagramas de flujo

Fase II: validez de contenido de los procesos operativos desarrollados

## Fase I

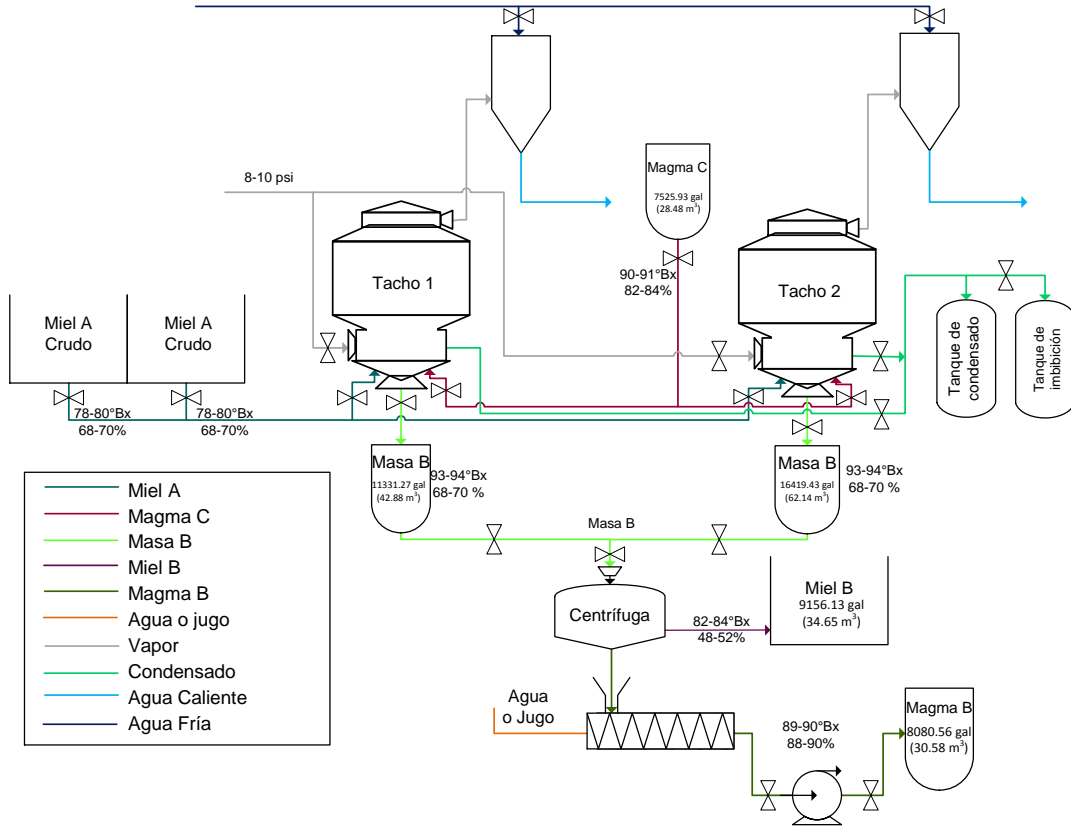
Los siguientes diagramas de flujo son una representación gráfica del proceso de transformación que tiene el jugo de caña como materia prima, al pasar a través de operaciones unitarias hasta obtener masa C, B y A. Cada uno de los cinco diagramas incluye los equipos indispensables para la operación unitaria y los parámetros de desempeño o condiciones óptimas de operación.

Figura 5. **Preparación de masa C en tacho *batch***



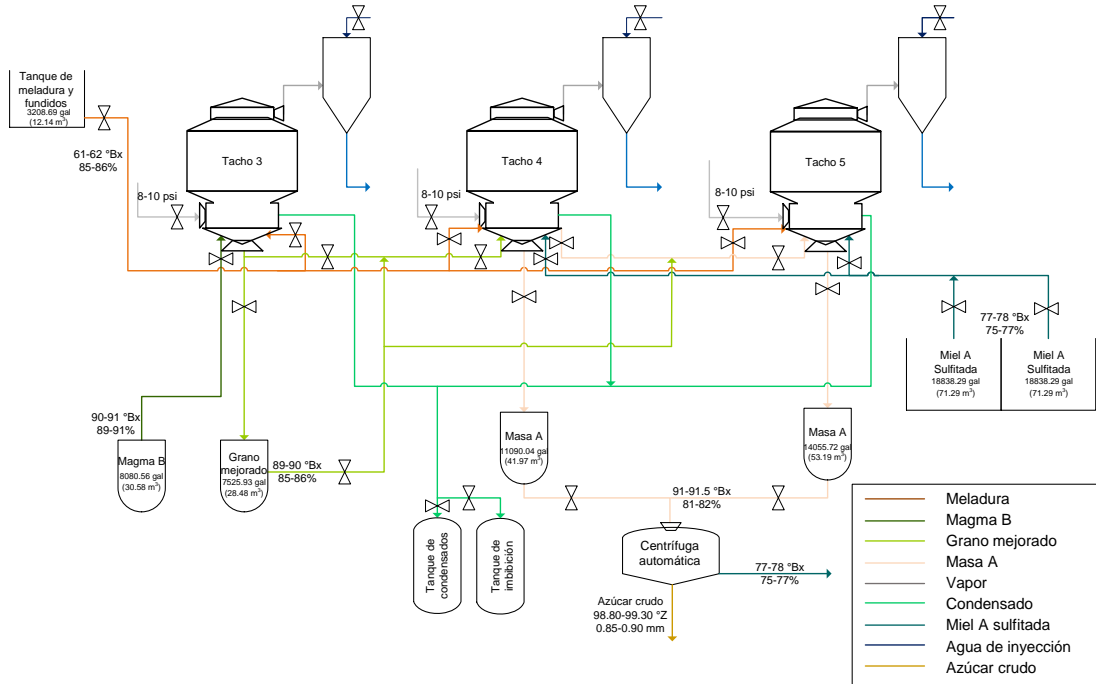
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Preparación de masa B en tacho *batch*



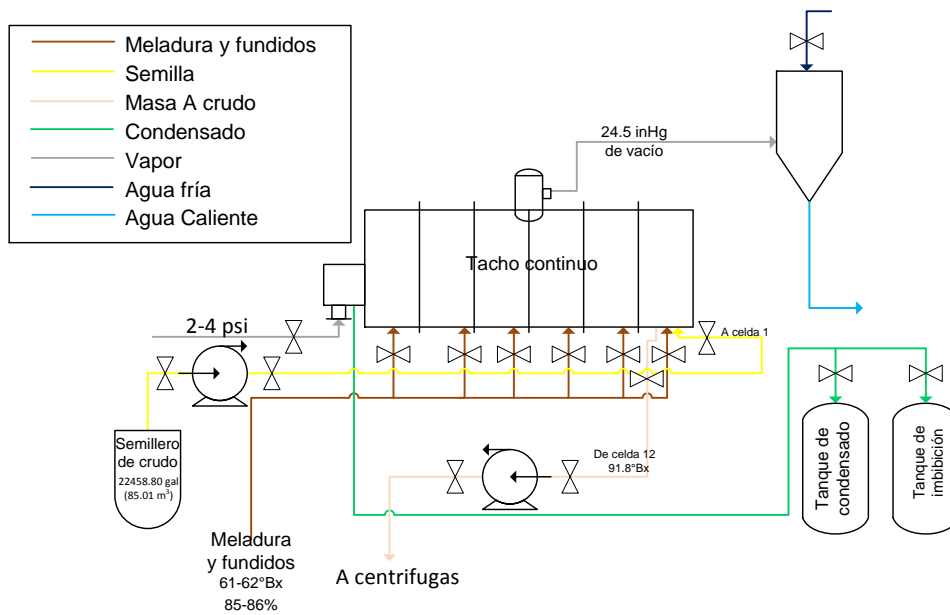
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Preparación de masa A crudo en tacho *batch*



Fuente: elaboración propia.

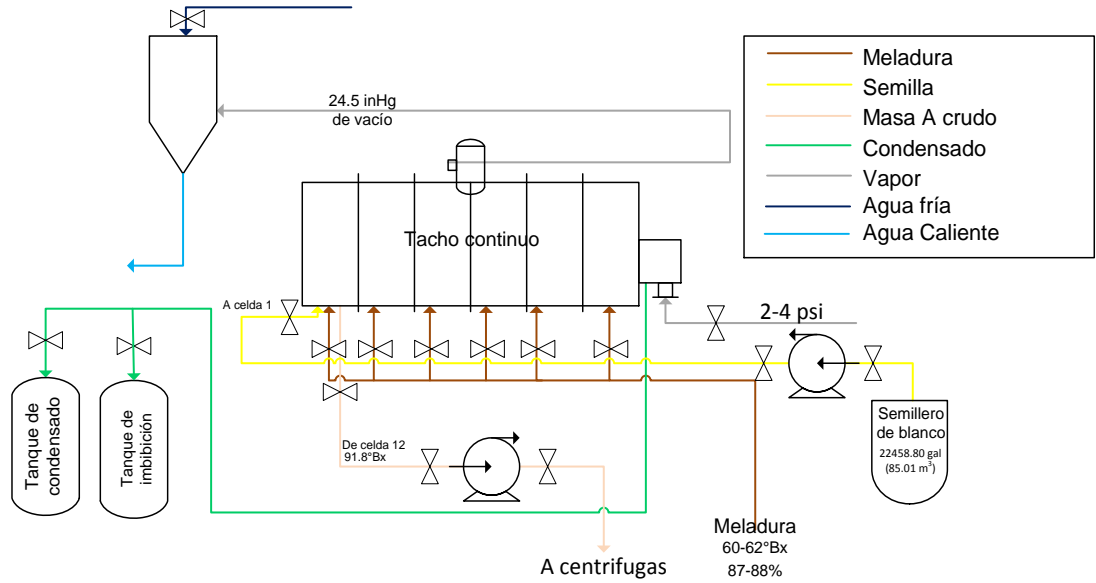
Figura 8. Preparación de masa A crudo en tacho continuo



Fuente: elaboración propia.

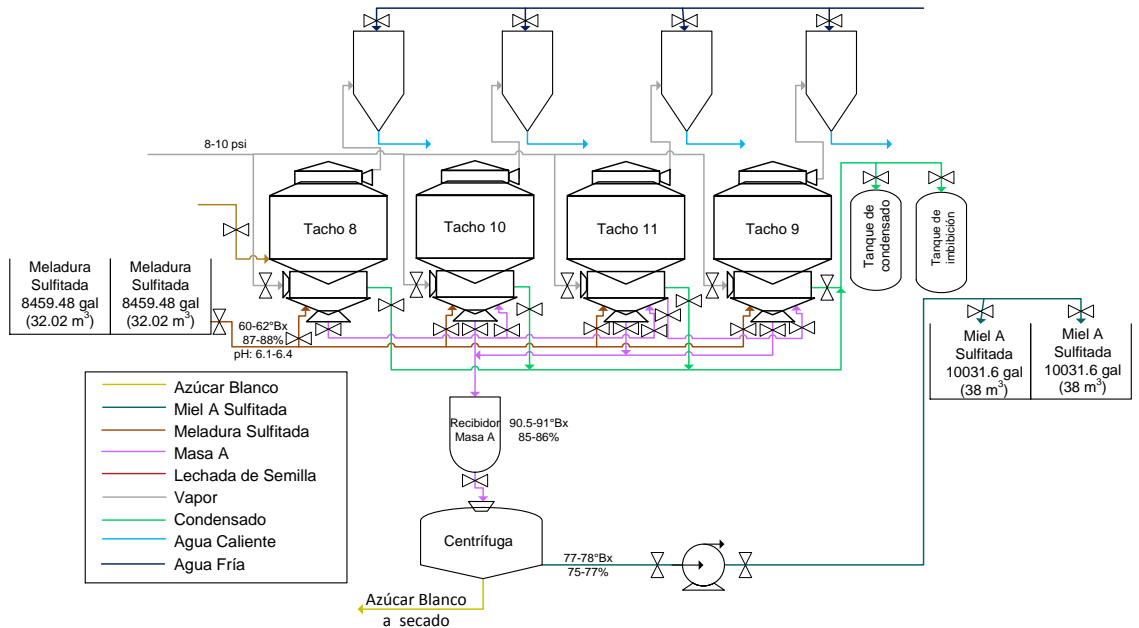


Figura 9. Preparación de masa A blanco estándar en tacho continuo



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Preparación de masa A blanco estándar en tacho *batch*



Fuente: elaboración propia.

## Fase II

En las siguientes tablas se presentan los índices considerados para evaluar la validez de contenido de los documentos del proceso operativo de cristalización, tales como congruencia de Osterlin ( $I_{ik}$ ), razón de validez de contenido de Lawshe (RVC), índice de validez de contenido (IVC) y concordancia de Kendall (W). Los parámetros que cada juez evaluó en los procesos operativos son: congruencia, coherencia, relevancia y claridad, tal y como se detalló en la sección de diseño metodológico.

Tabla VII. **Validez de contenido del documento 1-IN-F-I-025 (instructivo de operación del sistema de vacío en tachos)**

Sección	Subsección	ÍNDICES				
		RONDA 1*				
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	1,000	0,000
2	----	1	1			
3	3,1	1	1			
	3,2		1			
4	----	1	1			

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.

$I_{ik}$  = concordancia de Osterlin, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Validez de contenido del documento 1-IN-F-I-045 (instructivo para el almacenamiento y dosificación de tensoactivo para masa C)**

Sección	Subsección	ÍNDICES						
		RONDA 1*					RONDA 2	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	----	1	1					
3	3,1	1	1					
	3,2		1					

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Validez de contenido documento 1-IN-F-I-046 (instructivo para la operación de tachos *batch* para masa C)**

Sección	Subsección	ÍNDICES						
		RONDA 1*					RONDA 2	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,940	0,000	1	0
2	----	1	1					
3	3,1	1	1					
	3,2		1					
	3,3		1					
	3,4		1					
	3,5		1					
4	----	1	1					

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Validez de contenido documento 1-IN-F-I-054 (instructivo para la limpieza de tacho *batch*)**

Sección	Subsección	ÍNDICES						
		RONDA 1*					RONDA 2	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,929	0,000	1,000	0,000
2	----	1	1					
3	3,1	1	1					
	3,2		1					
	3,3		1					
4	----	1	1					

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  
 $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Validez de contenido documento 1-IN-F-I-047 (instructivo para la operación de tachos *batch* para masa B)**

Sección	Subsección	ÍNDICES								
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,975	0,0	0,333	0,416	1	0,006
2	----	1	1							
3	3,1	1	1							
	3,2		1							
	3,3		1							
4	----	1	1							

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  
 $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-065 (instructivo para la operación de cristalizadores de masa A crudo, B y C)

Sección	Subsección	ÍNDICES								
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,960	0,000	0,333	0,423	1,000	0,004
2	----	1	1							
3	3,1	1	1							
	3,2		1							
	3,3		1							
3,4	1									
4	----	1	1							

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-066 (instructivo de operación de sistema de cristalografía)

Sección	Subsección	ÍNDICES								
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,964	0,000	0,333	0,429	1,000	0,002
2	----	1	1							
3	3,1	1	1							
	3,2		1							
	3,3		1							
	3,4		1							
4	----	1	1							

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Validez de contenido documento 1-IN-F-P-005 (procedimiento para la cristalización de azúcar blanco estándar y azúcar crudo)**

Sección	Subsección	ÍNDICES								
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3	
		I <sub>ik</sub>	RVC	IVC	W	A	W	α	W	α
1	----	1	1							
2		1	1							
3	----	1	1							
4	4,1	1	1	1	0,964	0,000	0,700	0,014	1	0,001
	4,2		1							
	4,3		1							
	4,4		1							
	4,5		1							
4,6	1									
5	----	1	1							

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción. I<sub>ik</sub> = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Validez de contenido documento 1-IN-F-I-048 (instructivo para la preparación de semilla para masa A crudo)**

Sección	Subsección	ÍNDICES										
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3		RONDA 4	
		I <sub>ik</sub>	RVC	IVC	W	A	W	α	W	α	W	α
1	----	1	1									
2	----	1	1									
3	3,1	1	1	1	0,964	0,0	0,333	0,429	0,725	0,026	1,0	0,0
	3,2		1									
	3,3		1									
	3,4		1									
	3,5		1									
4	----	1	1									

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción. I<sub>ik</sub> = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Validez de contenido documento 1-IN-F-I-049 (instructivo para la operación de tacho *batch* para la cristalización de masa A crudo)**

Sección	Subsección	ÍNDICES										
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3		RONDA 4	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,975	0,000	0,667	0,075	0,722	0,043	1,000	0,000
2	----	1	1									
3	3,1	1	1									
	3,2		1									
	3,3		1									
4	----	1	1									

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Validez de contenido documento 1-IN-F-I-050 (instructivo para la operación del tacho continuo de azúcar crudo)**

Sección	Subsección	ÍNDICES										
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3		RONDA 4	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,959	0,000	0,815	0,023	0,724	0,033	1,000	0,000
2	----	1	1									
3	3,1	1	1									
	3,2		1									
	3,3		1									
	3,4		1									
4	----	1	1									

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Validez de contenido documento 1-IN-F-I-051 (instructivo para la preparación y almacenamiento de semilla de masa A blanco)**

Sección	Subsección	INDICES										
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3		RONDA 4	
		I <sub>ik</sub>	RVC	IVC	W	α	W	α	W	α	W	α
1	----	1	1	1	0,923	0,000	0,544	0,121	0,619	0,062	1,000	0,000
2	----	1	1									
3	3,1	1	1									
	3,2		1									
	3,3		1									
	3,4		1									
3,5	1											
4	----	1	1									

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción. I<sub>ik</sub> = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Validez de contenido documento 1-IN-F-I-052 (instructivo para la operación del tacho continuo de azúcar blanco estándar)**

Sección	Subsección n	INDICES										
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3		RONDA 4	
		I <sub>ik</sub>	RVC	IVC	W	α	W	α	W	α	W	α
1	----	1	1	1	0,944	0,000	0,994	0,007	0,724	0,033	1,000	0,000
2	----	1	1									
3	3,1	1	1									
	3,2		1									
	3,3		1									
	3,4		1									
4	----		1	1								

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción. I<sub>ik</sub> = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.



Tabla XX. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-053 (instructivo para la operación de tachos *batch* para cristalización de masa A blanco estándar)

Sección	Subsección n	ÍNDICES										
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3		RONDA 4	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,929	0,000	0,267	0,549	0,818	0,022	1,000	0,000
2	----	1	1									
3	3,1	1	1									
	3,2		1									
	3,3		1									
4	----	1	1									

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-055 (instructivo para la limpieza de tacho continuo de azúcar blanco estándar)

Sección	Subsección n	ÍNDICES										
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3		RONDA 4	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	$\alpha$
1	----	1	1	1	0,914	0,000	0,556	0,101	0,824	0,008	1,000	0,000
2	----	1	1									
3	3,1	1	1									
	3,2		1									
	3,3		1									
	3,4		1									
	3,5		1									
3,6	1											
4	----	1	1									

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Validez de contenido documento 1-IN-F-I-056 (instructivo para la limpieza de tacho continuo de azúcar crudo)

Sección	Subsección	ÍNDICES										
		RONDA 1*					RONDA 2		RONDA 3		RONDA 4	
		$I_{ik}$	RVC	IVC	W	$\alpha$	W	$\alpha$	W	A	W	$\alpha$
1	----	1	1									
2	----	1	1									
3	3,1	1	1	1	0,914	0,000	0,667	0,042	0,824	0,008	1,000	0,000
	3,2		1									
	3,3		1									
	3,4		1									
	3,5		1									
	3,6		1									
4	----	1	1									

\*Ronda 1, los jueces evalúan los 4 parámetros, coherencia, concordancia, relevancia y claridad. En las siguientes rondas los jueces evalúan únicamente el parámetro claridad considerando aspectos como comprensión, sintaxis y semántica en su redacción.  $I_{ik}$  = concordancia de Osterlind, RVC= validez de contenido de Lawshe, IVC= índice de validez de contenido, W = Concordancia de Kendall.

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### Fase I

En el proceso de obtención de azúcar de caña, se observa que el método empleado en el Ingenio Madre Tierra es el de tres etapas generales: masa C, masa B y masa A. En la figura 5 se presenta el diagrama de flujo de la obtención de la templa de tercera o masa C, donde se busca idealmente obtener en promedio una concentración entre 97 a 98 °Bx (es decir 97-98 gramos de sacarosa disuelta de 100 gramos de disolución total) a través de la cristalización de la meladura que contiene alrededor de concentración de 62°Bx. Además, se debe tomar en cuenta el agotamiento de las mieles de primera y de segunda, miel A y miel B, respectivamente, de forma que se logre recuperar el contenido de sacarosa sin cristalizar durante la elaboración de la templa de primera y de segunda.

Un punto importante que recalcar en esta figura es que el tacho 6 aparece dos veces en este diagrama; esto se debe a que para la elaboración de la templa de tercera deben ocurrir subprocesos que permitan la adecuada generación del grano. Este punto es primordial, es en esta etapa en la que se da el semillamiento, es decir, cristales de azúcar preparados en solución alcohólica, que según la ley de McCabe, crecerán a la misma velocidad lineal. Este primer lote de cristales producidos es el que se conoce como grano virgen, que se espera que tenga alrededor de 90,5°Bx. Posterior a esto, se debe aumentar la concentración del grano virgen a través de la alimentación de miel B, esperando obtener aproximadamente una concentración de 91°Bx, este se conoce como grano rebajado.

Finalmente, la elaboración de la masa C se obtiene a través de la concentración del grano rebajado hasta obtener concentraciones alrededor de 97,5°Bx. Las etapas posteriores, como se observa en la figura, consisten en equipos que permitirán al grano formado en el tacho seguir creciendo por medio de la agitación en los recibidores y cristalizadores Werkspoor y continuos.

En la figura 6 se observa el proceso de obtención de la templa de segunda o masa B a través de la alimentación de magma C y mieles de primera. De igual forma que con la masa C, el crecimiento cristalino de la sacarosa se ve determinado por la ley de McCabe y la ley de Ostwald. En este caso, la masa B se espera que alcance una concentración alrededor de 94°Bx.

A diferencia de la templa de tercera, la templa de segunda no incluye una etapa de agitación posterior muy exhaustiva, dado a que la función principal de esta etapa ya no es la formación de nuevos cristales, sino el crecimiento de los cristales que existen. Esto lleva a la figura 7, en donde se obtiene la templa de primera o masa A.

De la misma forma que en la templa de segunda, en la templa de primera el crecimiento cristalino es el principal objetivo, por lo que se alimenta magma B y meladura para aumentar la concentración y finalmente se utiliza solo los mezcladores. Estos mezcladores favorecerán la transferencia de masa del medio hacia la superficie de los cristales y así se fomentará el crecimiento buscado. Debido a que esta es la etapa final, la masa A debe alcanzar un aproximado de 92°Bx que al finalizar la etapa de centrifugado el cristal tendrá alrededor de 99,30°Z y un tamaño de 0,90mm.

La figura 11 mantiene un comportamiento similar a la figura 7, en base al proceso de transferencia de masa y crecimiento cristalino; la diferencia reside

en los equipos utilizados y en que se utiliza meladura sulfitada para elaborar azúcar blanco tipo B.

En la figura 8, como en la figura 9, se observa el proceso de obtención de masa A o templa de primera, a través de un tacho continuo de 12 celdas. En este el proceso de manejo referente a la alimentación del equipo es más sencillo ya que únicamente se debe alimentar en la celda 1, semilla con un tamaño de cristal de alrededor de 0,60mm y en la celda 7, semilla con un tamaño de cristal de alrededor de 0,80mm. Esta forma de alimentación permite favorecer el crecimiento ordenado y progresivo de los cristales; de nuevo recurriendo a la ley de Ostwald.

## Fase II

Al diseñar y elaborar el procedimiento operativo de cristalización del azúcar blanco estándar tipo B y crudo, después de una investigación documental y observaciones de campo se identificó la necesidad de elaborar quince documentos por lo que se establecieron objetivos y formatos para su elaboración proporcionados por el Departamento de Sistemas de Gestión del Ingenio.

Al elaborar cada documento se procedió a validar su contenido utilizando la metodología Delphi, en donde cada experto evaluó para cada uno de ellos congruencia, coherencia, relevancia y claridad en una escala ordinal, permitiendo así obtener los índices de congruencia de Osterlin, razón de validez de contenido de Lawshe, índice de validez de contenido de Lawshe y concordancia de Kendall.

- Resultados primera ronda

La evaluación de los expertos expresada a través de los índices: congruencia de Osterlin, razón e índice de validez de Lawshe, con valores todos de 1 indican que para los expertos los quince documentos tienen congruencia, coherencia y relevancia es decir que la relación entre el “objetivo del documento” y su “contenido” se cumple siendo coherente en su forma y el contenido relevante.

La concordancia de Kendall (W) para los quince procesos operativos obtuvo valores mayores de 0,90 con valores p inferiores a 0,05 siendo altamente significativos, lo que permite rechazar la hipótesis nula de no concordancia entre expertos y, por lo tanto, aceptar la hipótesis alterna de concordancia entre los expertos. Se observa que los jueces concuerdan en evaluar muy bien los parámetros de congruencia, coherencia y relevancia, pero también concuerdan en dar valores bajos al parámetro claridad, por lo que se decide hacer una segunda ronda a todos los documentos establecidos en la metodología Delphi únicamente con el parámetro claridad.

Todos los documentos contemplan una sección del uso del sistema de vacío en los tachos; por lo que uno de los expertos sugiere realizar un nuevo documento que contemple el manejo adecuado del sistema de vacío. Generando finalmente un resultado de dieciséis documentos en total y no los quince que se habían planteado en el inicio del proyecto.

- Resultados segunda ronda

Se realizan los cambios sugeridos por los expertos a los quince documentos con relación al parámetro claridad, considerando elementos como comprensión, sintaxis y semántica y se realiza la segunda ronda.

Para tres de los documentos (1-IN-F-I-045, 046 Y 054) se obtiene una concordancia de Kendall con valor de 1 y p menor a 0,05 altamente significativos que permiten rechazar la hipótesis nula de no concordancia y aceptar la hipótesis alterna de la existencia de concordancia positiva entre los expertos. En los doce restantes esto no sucede, evidenciándose en el índice de concordancia de Kendall con valores de 0,267 a 0,99 con p superiores a 0,05 que no permite rechazar la hipótesis nula de no concordancia.

Para el nuevo documento 1-IN-F-I-025, los expertos lo evalúan muy bien en todos los parámetros (congruencia, coherencia, relevancia y claridad) por lo que queda validado y aprobado.

- Resultados tercera ronda

Se realizan los cambios sugeridos por los expertos a doce de los documentos y se realiza la tercera ronda.

Para dos de los procesos operativos (1-IN-F-I-047, 065, 066 y 1-IN-P-005) se obtiene una concordancia de Kendall con valor de 1 y p menor a 0,05 altamente significativos que permiten rechazar la hipótesis nula de no concordancia y aceptar la hipótesis alterna de la existencia de concordancia

positiva entre los jueces. Sin embargo, en los restantes esto no sucede evidenciándose en el índice de concordancia de Kendall con valores de 0,62 a 0,82 con  $p$  superiores a 0,05 que no permite rechazar la hipótesis nula de no concordancia

- Resultados cuarta ronda

Se realizan los cambios sugeridos por los expertos a los ocho documentos restantes y se realiza la cuarta ronda.

Se obtiene, para los ocho, una concordancia de Kendall con valor de 1 y  $p$  menor a 0,05 altamente significativos que permiten rechazar la hipótesis nula de no concordancia y aceptar la hipótesis alterna de la existencia de concordancia positiva entre los expertos. Quedando todos los documentos validados y aprobados.

Cuando los instrumentos y el procedimiento han llegado a valores aceptables de concordancia, se puede deducir que los documentos han sido aceptados y autorizados para su distribución. La primera revisión externa fue realizada por el Departamento Sistema de Gestión del Ingenio Madre Tierra, de forma que se verificará que el documento cumpliera con el formato y redacción adecuados según las normas que se manejan de los documentos auditables para los normativos ISO 9001 y FSSC 22000. Los cambios surgidos dentro de esta revisión no se incluyen en el estudio del método Delphi, ya que los expertos presentaron común acuerdo en realizarlos al momento de la revisión.



## 6. LOGROS OBTENIDOS

El enfoque principal del proyecto era generar los documentos del procedimiento operativo de la etapa de cristalización de azúcar crudo y azúcar blanco estándar tipo B, de forma que se redujera el margen de error debido a que se había manejado la cristalización como un proceso de experiencia manual y visual de los maestros tacheros. Luego de la validación de los documentos, seguida de la divulgación correspondiente, todo operario, supervisor de tachos y jefe de turno tenía el conocimiento sobre la existencia de los documentos elaborados.

Como resultado, cualquier persona involucrada en la etapa de cristalización del azúcar o cualquier miembro del Ingenio Madre Tierra puede llegar, leer e identificar los procesos que se realizan para la cristalización. Esto se identifica como ventaja, ya que las capacitaciones se vuelven más sencillas debido que se tiene un respaldo de los procedimientos y algoritmos de fabricación, permitiendo así a cualquier persona ajena incluso al ingenio, comprender el proceso descrito en los documentos elaborados.

Por otro lado, debido a que se tienen los documentos y registros en orden, Ingenio Madre Tierra fue auditado exitosamente por un nuevo cliente, según las normas PEPSICO; permitiendo abrir más la cartera de clientes y trabajar en mejores ofertas para las demandas crecientes de azúcar de los clientes locales. Esto, sin duda alguna, abre nuevos horizontes para el azúcar producido por Ingenio Madre Tierra.



## CONCLUSIONES

1. En concordancia con el Sistema de Gestión del Ingenio Madre Tierra, todo documento incluido en la rama de “Procedimiento” abarca como mínimo las etapas de: alcance, propósito, términos y definiciones, desarrollo, documentos relacionados y control de cambios o modificaciones en el documento. Por otro lado, la rama de “Instructivo” abarca como mínimo las etapas de: propósito, términos y definiciones, desarrollo, documentos relacionados y control de cambios o modificaciones en el documento.
2. Debido a confidencialidad dentro del Ingenio Madre Tierra, los valores analizados de los parámetros de desempeño descritos en el diario de fabricación no pueden ser extraídos del área física del ingenio y, por tanto, no pueden ser descritos dentro de este documento. Sin embargo, se puede comentar que se obtuvo una eficiencia de 83,75 %.
3. Se generaron cinco instructivos operativos para la obtención de azúcar crudo, tres instructivos operativos para la obtención de azúcar blanco estándar tipo B y cuatro instructivos operativos de equipos adicionales que incluyen el sistema de cristalografía, sistema de vacío en tachos, cristalizadores y almacenamiento y dosificación de tensoactivo para masa C.
4. Se generó un procedimiento de cristalización que describe, e incluye los instructivos, la elaboración y obtención de azúcar crudo y azúcar blanco estándar en tachos *batch* y continuos.

5. Se generaron tres instructivos de limpieza de los equipos, incluyendo los tachos *batch*, tacho continuo para azúcar crudo y tacho continuo para azúcar blanco estándar tipo B.
  
6. El parámetro claridad, en donde se debe evaluar comprensión, sintaxis y semántica, fue el que generó menor nivel de concordancia entre los expertos, recurriendo en mayor cantidad de rondas o ciclos del método Delphi.

## RECOMENDACIONES

1. Previo a la elaboración de los documentos (instructivos y/o procedimientos) se recomienda indagar en la existencia de algún formato establecido para otros documentos. Esto permitirá ahorrar tiempo en la corrección de formato.
2. Para la aprobación de los documentos, se tomaron en cuenta tres expertos en el tema, sin embargo, para obtener mayor significancia en los estadísticos se sugiere incluir a más de tres.
3. Explicar detalladamente cómo llenar el instructivo de evaluación para los documentos realizados, previo a trasladar los documentos para evitar que las evaluaciones se vean afectadas por falta de claridad en el llenado del instrumento del método Delphi.
4. Utilizar hojas de evaluación (instrumento del método Delphi) separadas, según el documento por evaluar.



## BIBLIOGRAFÍA

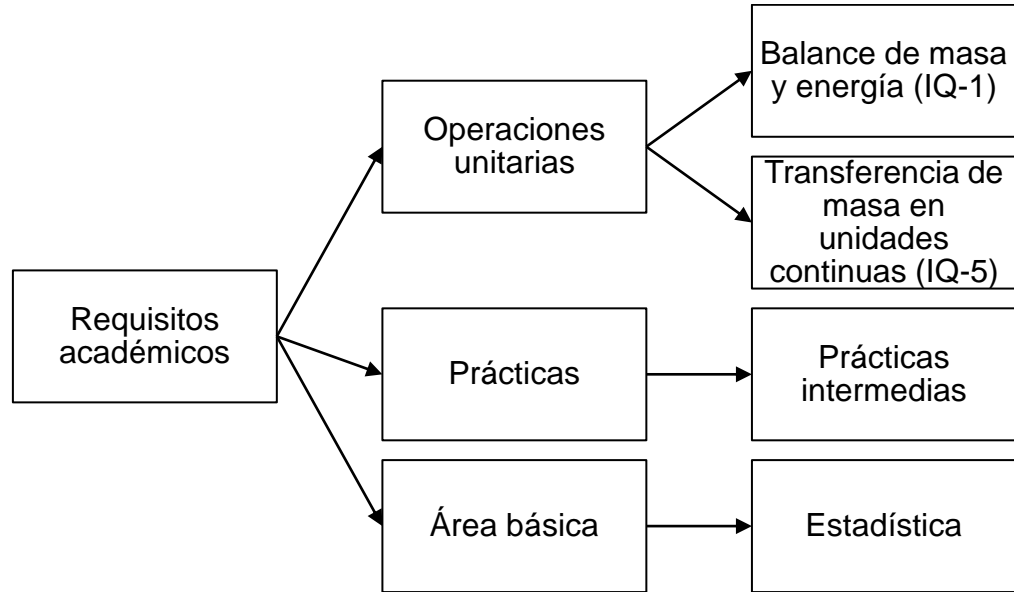
1. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. México: Limusa, 2000. 1200 p.
2. ESCOBAR, Jazmine. Cuervo, Ángela. *Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización*. Colombia: Universidad El Bosque, 2008. 36 p.
3. GIL, Beatriz. Pascual, David. *La metodología Delphi como técnica de estudio de la validez de contenido*. España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia, 2012. 1020 p.
4. HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering*. 3a. ed. Amsterdam: Elsevier, 1986. 1166 p.
5. ISO/TC 34, *Productos alimenticios. Sistemas de gestión de la inocuidad de los alimentos – requisitos para cualquier organización en la cadena alimentaria*. Suiza: ISO copyright office, 2005. ISO 22000:2005. 22 p.
6. ISO/TC 176, *Gestión y aseguramiento de la calidad subcomité SC 2, Sistemas de la calidad. Sistemas de gestión de la calidad – Requisitos*. Suiza: ISO copyright office, 2008. ISO 9001:2008. 32 p.

7. McCABE, Warren, et al. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7a. ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2013. 1189 p.
8. PERRY, Robert y Green, Don. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8a. edición. New York: McGraw-Hill, 2008. 2735 p.
9. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín: Bartens, 2012. 879 p.
10. VARELA, Margarita. *Descripción y usos del método Delphi en investigaciones del área de la salud*. México: Elsevier México, 2012. 95 p.



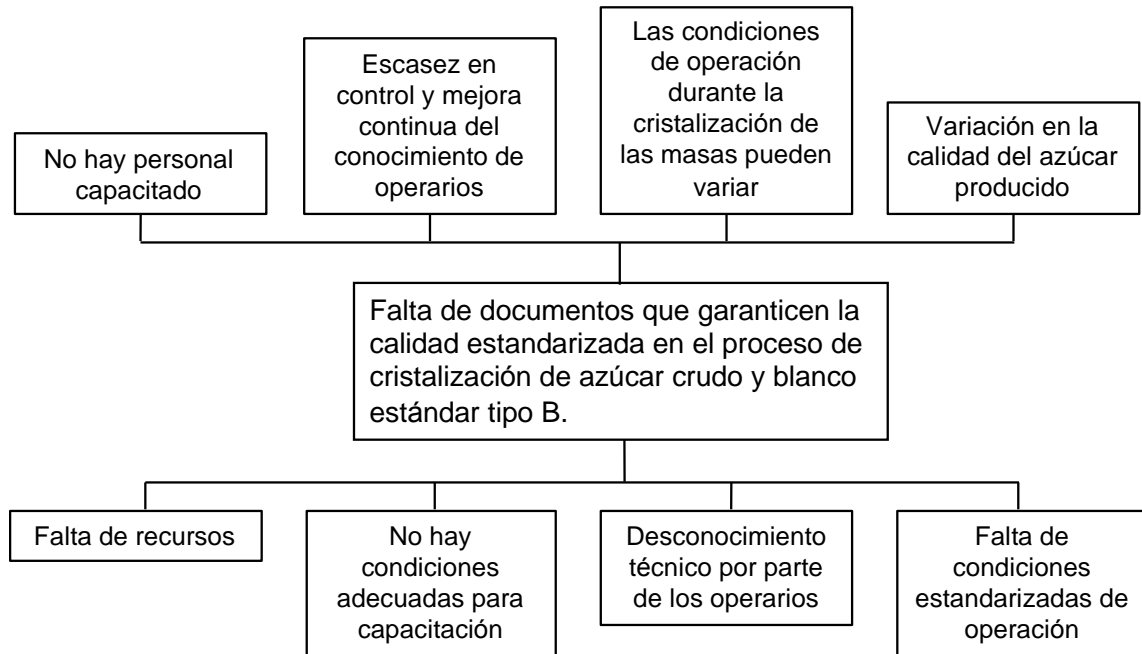
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Requisitos académicos



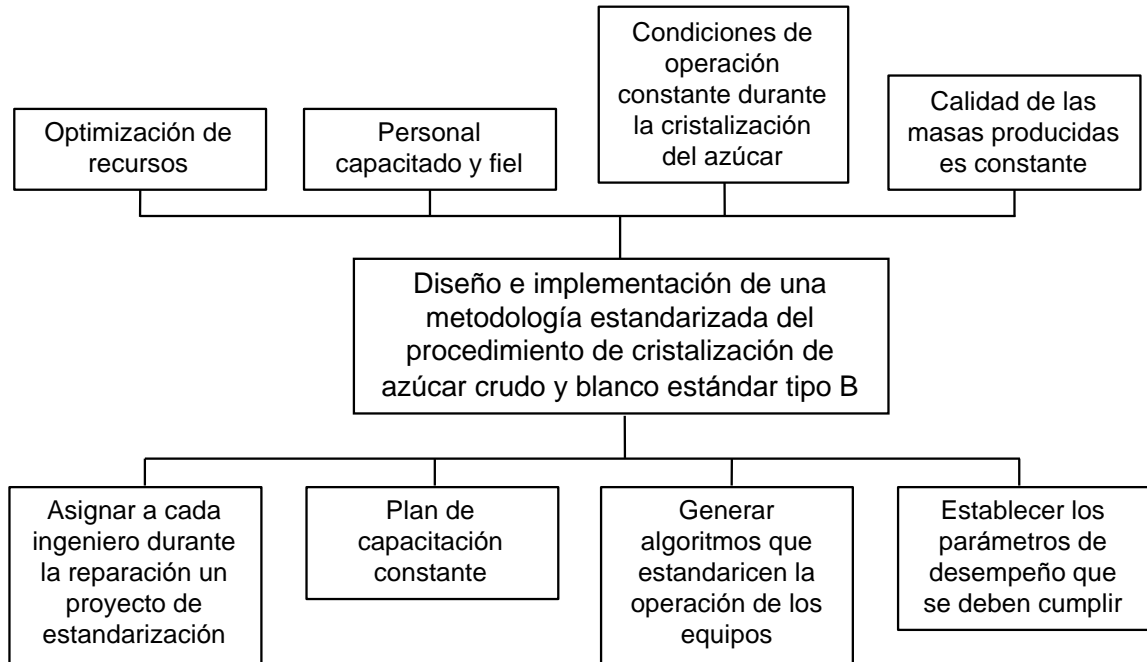
Fuente: elaboración propia

## Apéndice 2. **Árbol de problemas**



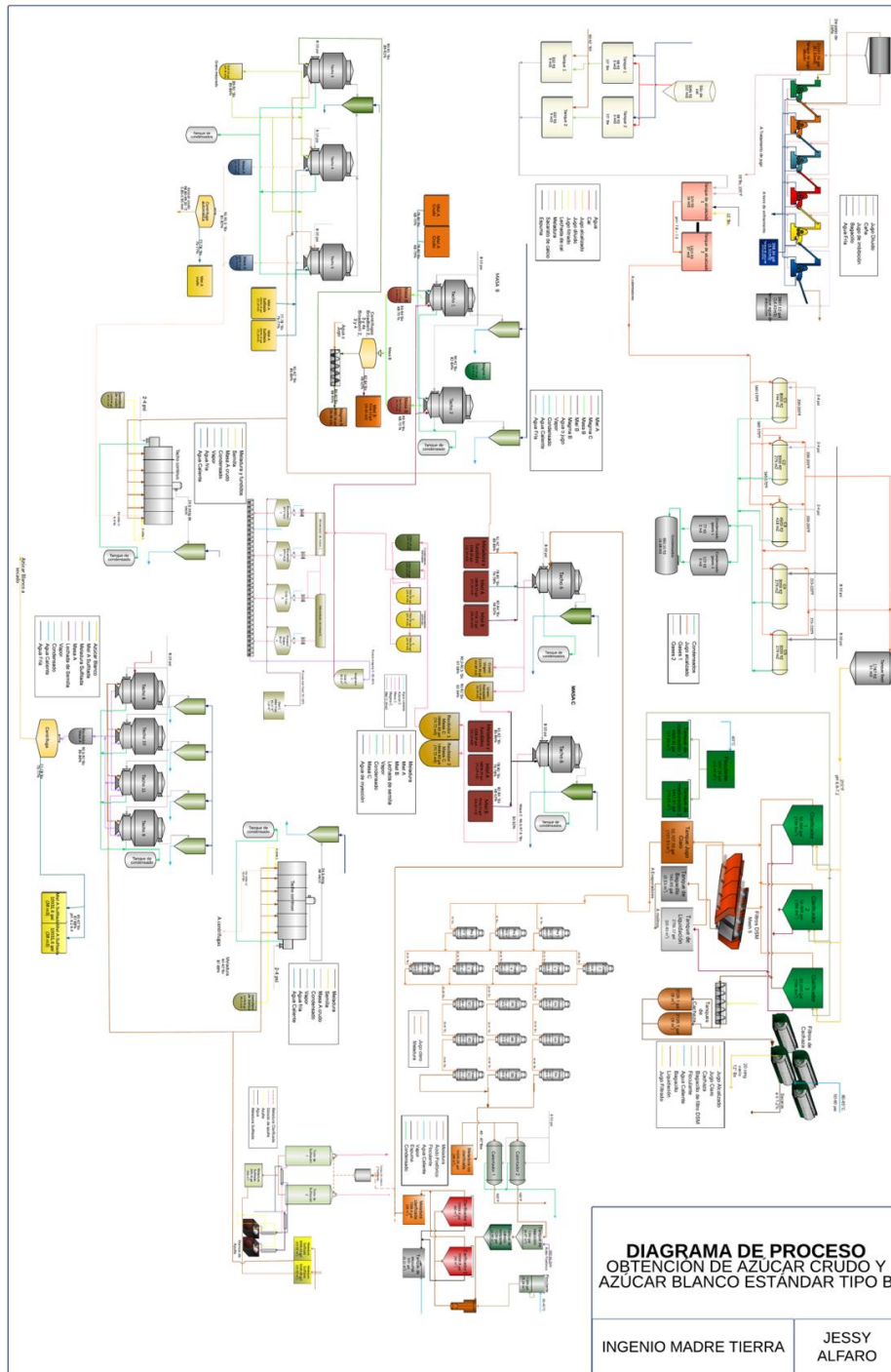
Fuente: elaboración propia

### Apéndice 3. **Árbol de soluciones**



Fuente: elaboración propia

Apéndice 4. Diagrama de proceso de obtención de azúcar crudo y blanco estándar tipo B.



Fuente: elaboración propia empleando Visio.

## ANEXO

### Anexo 1. Instrumento 001

Dimensión	Item	Congruencia	Coherencia	Relevancia	Claridad	Observaciones
1.1	a					
	b					
	c					
	...					
1.2	a					
	b					
	...					
1.3	a					
	b					
	...					

Fuente: ESCOBAR, Jazmine. et al. *Validez de contenido y juicio de expertos.*

